



**Donde la energía del sol y la tierra se unen para construir
un futuro sostenible y en armonía con el ambiente.**



Información Legal

Geovoltaica Revista de Energía y Sostenibilidad, Año 1, Número 1. Enero-Abril 2025, es una publicación cuatrimestral, editada por el Dr. Néstor Daniel Galán Hernández, Coto 12 Número 4902, Real del Valle, 82124 Mazatlán, Sinaloa, México, <https://www.revistageovoltaica.com> E-mail: editor@revistageovoltaica.com. Editores responsables: Dr. Eber Enrique Orozco Guillén, Dr. Guillermo Rubio Astorga y Dr. Erik Vázquez Fernández. Reserva de derechos al uso exclusivo En trámite, ISSN: En trámite. Ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Néstor Galán. Real del Valle, Coto 12, Núm 4902. Código Postal 82124. Fecha de última Actualización 07 de Marzo de 2025. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación.



GEOVOLTAICA

Revista de Energía y Sostenibilidad



revistageovoltaica.com

Editorial

Innovar, colaborar y transformar: Nuestro rol en la construcción de un futuro sostenible"

En el escenario actual, donde los desafíos energéticos y ambientales demandan soluciones innovadoras y sostenibles, nace Geovoltaica, una publicación dedicada a explorar y analizar las intersecciones entre energía, sostenibilidad y desarrollo tecnológico. Este primer número marca el inicio de un espacio de diálogo y reflexión sobre temas de importancia para el sector académico, profesional y público en general. La crisis climática ha dejado de ser una advertencia para convertirse en una realidad que exige acciones inmediatas y efectivas. El incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, junto con el agotamiento de recursos naturales, nos urge a repensar nuestros modelos de producción y consumo energético. En este contexto, las energías renovables son alternativas viables para la supervivencia y el desarrollo sostenible.

Geovoltaica se propone como una plataforma para explorar investigaciones e innovaciones en tecnologías limpias, desde los avances en energía solar fotovoltaica y eólica hasta las prometedoras aplicaciones del hidrógeno verde. Nuestro compromiso es presentar investigaciones rigurosas, análisis técnicos y casos de estudio que demuestren la viabilidad y eficiencia de estas soluciones. La calidad y eficiencia energética ocupan un lugar central en nuestra agenda editorial. Entendemos que la transición hacia un futuro sostenible requiere no solo de nuevas fuentes de energía, sino también de una gestión más inteligente y eficiente de los recursos existentes. Las Smart Grids, el almacenamiento energético y las tecnologías de gestión de la demanda son temas que requieren análisis en profundidad.

El cambio climático, como fenómeno global, exige respuestas coordinadas y multidisciplinarias. Por ello, nuestras páginas darán cabida a voces expertas de diversos campos: ingeniería, ciencias ambientales, economía y política energética. Esta aproximación holística nos permitirá abordar la complejidad de los retos actuales desde múltiples perspectivas. Geovoltaica nace con la convicción de que el conocimiento y la difusión de información técnica especializada son fundamentales para impulsar la transición energética. Invitamos a investigadores, profesionales y expertos del sector a contribuir con sus conocimientos y experiencias en los próximos números.

En este primer número, presentamos una selección de artículos que abordan desde innovaciones en tecnología fotovoltaica para alumbrado público, hasta estrategias de control y eficiencia energética en entornos rurales con mecanismos de automatización. Cada texto ha sido cuidadosamente seleccionado y se ha adoptado el sistema de arbitraje doble ciego para ofrecer información relevante y actualizada, manteniendo el rigor técnico que caracterizará a nuestra publicación.

En un mundo donde la sostenibilidad energética se ha convertido en un imperativo global, Geovoltaica se compromete a ser un referente en la difusión de conocimiento técnico y científico sobre energías limpias y desarrollo sostenible. A quienes investigan, desarrollan y cuestionan los paradigmas actuales: esta es su plataforma. Porque cada hallazgo, cada modelo y cada solución aplicada nos acercan a un mundo más eficiente, resiliente y equitativo.

Esperamos que este primer número sea el inicio de un diálogo productivo y constructivo sobre el futuro energético.

Dr. Néstor Daniel Galán Hernández

Editor en jefe

Geovoltaica

Revista de Energía y Sostenibilidad

Comité Editorial

- **Dr. Néstor Daniel Galán Hernández**
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Eber Enrique Orozco Guillén**
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dr. Guillermo Rubio Astorga**
Tecnológico Nacional de México, México
- **Dr. Erik Eduardo Vázquez Fernández**
Universidad De Colima, México

Comité Científico

- **Dr. Javier Bernardo Cabrera Mejia**
Universidad Católica de Cuenca, Ecuador.
- **Dr. Mario Luna Risco**
Universidad de Medellín. Colombia
- **Dra. Nildia Yamileth Mejias Brizuela**
Universidad Politécnica de Sinaloa, México.
- **Dra. Dulce Ambriz Pérez**
Universidad Nacional Autónoma de México.
- **Dr. David Ulises Santos Ballardo**
Centro de Investigaciones en Alimentación y Desarrollo, México.
- **Dr. José Adán Hernández Nolasco**
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- **Dr. Jorge Alberto Pérez Mendoza**
Instituto Politécnico Nacional, México.
- **Dr. Denis Javier Aranguri Cayetano**
Universidad del Santa, Perú
- **Dr. José Gregorio Marcano**
Universidad de Carabobo, Venezuela.

- **Gestión de Medios**
Ing. Jean Carlos Velarde Meza

- **Dirección de asuntos legales.**
Roberto Nila Higuera

CONTENIDO

- 7** **Diseño de control y monitoreo para sistema de riego en invernadero escala piloto.**
- 12** **Viabilidad sostenible de sistemas de alumbrado público y videovigilancia alimentados con energía solar fotovoltaica en las Islas Galápagos.**
- 21** **Transición Energética para un Mundo más Sostenible: Análisis de Percepciones y Desafíos Actuales.**
- 31** **Desarrollo de un Sistema de Gestión Térmica para Paneles Solares en una Estación de Carga para Vehículos Eléctricos.**
- 42** **Modelado e implementación de sistema mecánico masa-resorte-amortiguador: Una revisión.**
- 51** **Algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para un Convertidor Elevador de un Sistema Fotovoltaico vía Control Predictivo basado en Modelos.**

Algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para un Convertidor Elevador de un Sistema Fotovoltaico vía Control Predictivo basado en Modelos

Maximum Power Point Tracking Algorithm for a Boost Converter in a Photovoltaic System via Model Predictive Control

Mario Castro Torres, Aldo N. Higuera Juárez¹, Alejandro Lizárraga Lizárraga¹, David López Flores²

¹Maestría en Ciencias Aplicadas. Tecnologías Sostenibles. Universidad Politécnica de Sinaloa, ahiguera@upsin.edu.mx

²Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chihuahua, División de Posgrado e Investigación, david.lf@chihuahua.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) para gestionar el flujo de corriente y el proceso MPPT en un convertidor elevador de un sistema fotovoltaico utilizando la técnica de Control Predictivo basado en Modelos (MPC, Model Predictive Control). El algoritmo MPPT también utiliza una función lineal hibridada con la técnica MPC para obtener la referencia corriente que rastrea el MPC. Se modela el convertidor en espacio de estados para generar funciones de costo de la técnica MPC que controlan la corriente del inductor y frecuencia de conmutación del convertidor; priorizando el control de la corriente. El algoritmo se implementa en MATLAB/SIMULINK, dando un tiempo de respuesta de 2 ms en el control de corriente, 60 ms en el control indirecto de voltaje, lo cual impacta positivamente al proceso MPPT.

Palabras claves: Control predictivo basado en modelos, convertidor elevador, seguimiento del punto de máxima potencia, espacio de estados

Abstract

Abstract: This work presents a Model Predictive Control (MPC) approach for managing current flow to track the Maximum Power Point (MPPT) in a boost converter designed for power transfer to the grid. The MPC utilizes a linear function to obtain the virtual current reference. The system is modeled in state space to generate cost functions that control both the inductor current and the transistor switching frequency, prioritizing current control over frequency. The algorithm is implemented in MATLAB/SIMULINK, achieving a response time of 2ms for current control, 60ms for indirect voltage control, and robust MPPT.

Keywords: MPC, Boost Converter, MPPT, State Space.

Recibido: 14/02/2025; Aceptado 28/02/2025; Publicado 17/03/2025

Introducción

Los sistemas Fotovoltaicos (FV) son fundamentales en la transición energética al mismo tiempo que contribuyen a reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. Sin embargo, para lograr un aprovechamiento eficiente de los sistemas FV, se requiere de un algoritmo para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) de la energía fotovoltaica. Dado que la mayoría de los sistemas FV operan a niveles de voltaje bajos, los convertidores elevadores son comúnmente preferidos en estas aplicaciones [1, 2, 3]. De aquí, que en este trabajo se presenta un análisis del convertidor elevador de un sistema FV en espacio de estados. Este análisis es utilizado para el diseño del algoritmo MPPT utilizando Control Predictivo basado en Modelos (MPC, Model Predictive Control) para gestionar el flujo de corriente y obtener un apropiado proceso MPPT en el sistema FV.

Gestionar adecuadamente el flujo de corriente y el proceso MPPT requiere de un rápido tiempo de respuesta y una operación efectiva del algoritmo de MPPT, especialmente cuando se producen cambios instantáneos en el sistema, como los causados por sombras. Para mejorar el tiempo de respuesta en estas situaciones, se han presentado en la literatura varios algoritmos MPPT basados en diferentes técnicas, tales como: Redes Neuronales (NN, Neural Networks), Algoritmos

Genéticos (GA, Genetic Algorithms), Controladores basados en Lógica Difusa (FLC, Fuzzy Logic Controllers), Perturbación y Observación (P&O, Perturb and Observe) y MPC [1]. Las NNs aprenden patrones complejos, para esto requieren ser entrenadas con un relativo alto costo computacional [4]. Los GAs son útiles para entregar respuestas generales, sin embargo, pueden ser tardados en generar respuestas más específicas. Los FLCs son subjetivos al generar respuestas, debido a que depende totalmente del conocimiento del diseñador sobre el sistema. Los algoritmos de P&O son sencillos de aplicar, puesto que utilizan ecuaciones computacionalmente ligeras, pero producen respuestas oscilatorias alrededor del punto de máxima potencia [5]. En contraste, los MPCs utilizan el modelo del sistema para minimizar una función de costo y determinar soluciones óptimas, lo que inherentemente mejora el tiempo de respuesta y operación del algoritmo MPPT [6].

Los algoritmos MPPT basados en la técnica MPC se utilizan ampliamente en el control de los convertidores. Los análisis dinámicos de respuesta utilizando esta técnica muestran resultados con ligeros impulsos en el control del voltaje o de corriente [7]. En la literatura se reportan algoritmos MPPT que usan técnicas híbridas de MPC para generar una referencia de voltaje o corriente, reduciendo la carga computacional y aumentando la velocidad de respuesta del algoritmo. En [1] se genera la referencia de corriente del algoritmo MPPT con la

técnica de P&O. En [8] se agrega un FLC al híbrido de P&O-MPC para mejorar la respuesta del algoritmo MPPT, entregando tiempos de respuesta de hasta 45 ms. En este trabajo, para obtener un tiempo de respuesta de hasta 2 ms en el control de la corriente, el algoritmo MPPT utiliza una función lineal hibridada con MPC. Esta función lineal genera la referencia de corriente que procesa la técnica MPC para controlar la corriente del convertidor, manteniendo el voltaje estable mediante el control indirecto de la corriente.

El presente trabajo está organizado como sigue. En la sección 2 se describe el análisis necesario para generar los modelos utilizados en el MPC y la función lineal para el diseño del algoritmo MPPT. La sección 3 describe la implementación del algoritmo y presenta los resultados. Finalmente, la sección 4 menciona las conclusiones del trabajo.

Metodología

Las celdas fotovoltaicas son un arreglo de células semiconductoras que convierten la luz solar en energía eléctrica [10, 11]. Para transferir la máxima potencia a la carga, es necesario de un algoritmo MPPT que mantenga los valores de voltaje y corriente de la celda en los óptimos. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques utilizado en este trabajo para el algoritmo MPPT, el cual mantiene los niveles de voltaje y corriente de salida del sistema FV en sus valores óptimos. El algoritmo MPPT se diseñó con base en la hibridación de la función lineal para el cálculo de la corriente de referencia (bloque de color rojo) y la técnica MPC (bloque de color azul).

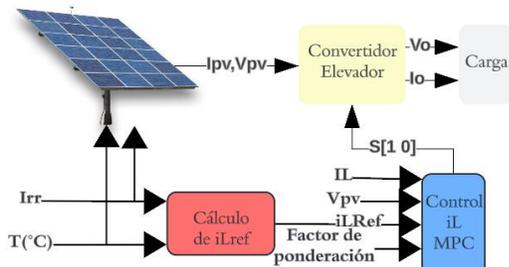


Figura 1. Algoritmo MPPT propuesto para el sistema FV.

El MPC es una técnica de control que predice el comportamiento del sistema a partir de los estados de control. El estado seleccionado como óptimo es el que minimiza la función de costo. La evaluación de la función de costo para cada periodo de muestreo se determina a partir del horizonte de muestreo (N) que puede escogerse en función de los requerimientos del sistema [9].

El horizonte de predicción utilizado en este trabajo se selecciona con N=1 debido a la dinámica del convertidor, donde se escoge el siguiente

estado de conmutación. De esta manera, la función de costo que incluye los estados futuros, la referencia y las acciones futuras se puede definir como:

$$g = f(x(k), u(k), \dots, u(k + N - 1)) \quad (1)$$

donde g es la función objetivo de costo que se busca minimizar, f es la función que describe el modelo del sistema en espacio de estados, $x(k)$ es el estado del sistema en el tiempo o iteración k , $u(k)$ es la entrada de control en el tiempo o iteración k y $u(k+N-1)$ representa las entradas de control en tiempos futuros $k+N-1$. En MPC, se optimiza una secuencia de entradas de control futuras para minimizar la función de costo en un horizonte de predicción de N pasos.

Para obtener la función de costo a utilizar en el control, se utiliza un método de discretización de tres pasos:

Modelar el convertidor para los estados posibles $S = [1 \ 0]$.

Obtener el modelo en tiempo discreto para las predicciones en cada instante de muestreo.

Definir la función de costo.

El convertidor elevador cuenta con dos estados de conmutación (ver figuras. 2(a) y 2(b) para estado de encendido y apagado, respectivamente). Cuando está encendido ($S = 1$), la corriente del inductor i_L calcula a partir de:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L) \quad (2)$$

donde V_{in} es el voltaje de entrada del convertidor y R_L es la resistencia interna del inductor L .

Cuando el convertidor está apagado ($S = 0$), la corriente del inductor resulta de:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L - V_{out}) \quad (3)$$

donde V_{out} es el voltaje de salida del convertidor.

La ecuación (1) y (2) se pueden sumar algebraicamente para conocer el comportamiento de la corriente del inductor durante un periodo de trabajo:

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - R_L i_L - V_{out}(1 - d)) \quad (4)$$

donde d es el ciclo de trabajo del convertidor:

$$d \begin{cases} 1 & \text{cuando } S = 1 \\ 0 & \text{cuando } S = 0 \end{cases}$$

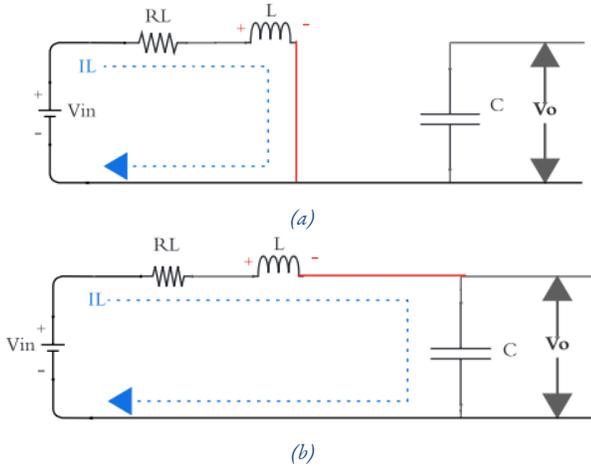


Figura 2. Estados de conmutación del convertidor elevador: (a) encendido con $S=1$ y (b) apagado con $S=0$.

A la ecuación (4) se le denomina modelo promediado del convertidor elevador para la corriente, ya que incluye los dos estados de conmutación.

En la literatura se describen distintas metodologías de discretización, entre las cuales, la aproximación de Euler es el más utilizado para sistemas de primer orden, ecs. (5). Combinando las ecuaciones (3) y (5) podemos obtener la ecuación 6 de predicción de la corriente del inductor:

$$\frac{d}{dt} i_L \approx \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} \quad (5)$$

$$i_L(k+1) = \frac{T_s}{L} (V_{in}(k) - R_L i_L(k) - V_{out}(k)(1-d) + i_L(k)) \quad (6)$$

donde T_s es el tiempo de muestreo e $i_L(k+1)$ es la corriente de predicción del inductor.

Para cada periodo de muestreo, el problema de optimización se resuelve con los nuevos datos disponibles en la iteración k , de esta manera se determina el estado de S . La técnica MPC no puede determinar el estado óptimo de S únicamente basándose en las predicciones, también es necesario minimizar el error entre el valor de referencia y el valor de predicción, lo cual se realiza mediante la función de costo mencionada en el paso 3 de la metodología. Esta es la razón por la cual la función de costo es uno de los elementos fundamentales en las aplicaciones que utilizan MPC. En este estudio se utiliza la función de costo descrita en la ecuación (7), que describe el error entre la predicción de corriente y la referencia i_{ref} :

$$g_i(k+1) = [i_{ref} - i_L(k+1)]^2 \quad (7)$$

Este método de control digital, que predice el siguiente valor de S en cada período de muestreo, necesita una segunda función de costo para reducir la frecuencia de conmutación. Dado que los métodos de control digital no utilizan comparadores para generar la señal de conmutación, pueden presentar frecuencias de conmutación variables. Si la frecuencia de conmutación es aproximadamente igual a la frecuencia de muestreo, el error de control aumentará. Para disminuir la frecuencia de conmutación, se utiliza la función de costo en la ecuación (8) y se emplea un factor de ponderación (λ) para limitar sus efectos en la función de costo total. En este estudio, el factor de ponderación se determinó como 0.1 utilizando el método de clasificación de funciones de costo propuesto en:

$$g_{sw}(k+1) = \lambda^* [d(k) - d(k-1)]^2 \quad (8)$$

Una de las ventajas significativas de utilizar dos funciones de costo es la capacidad de controlar múltiples parámetros empleando sola función. La función de costo total es resultado de la suma de las ecuaciones (7) y (8) propuestas:

$$g(k+1) = g_i(k+1) + g_{sw}(k+1) \quad (9)$$

Dado que el uso de la técnica del error cuadrático en funciones de costo con múltiples términos ofrece mejores resultados, como se reporta en [12], se prefirió el mismo enfoque en este estudio para obtener resultados más precisos. Esta es la razón por la cual se utilizan los cuadrados de las ecuaciones (7) y (8). En cada periodo de muestreo se calcula y minimiza la función de costo para S , ecuación (10), luego, utilizando la ecuación (11), se selecciona el estado en función del valor de $d(k)$ que arroje el valor mínimo de la función de costo [12].

$$d(k) = [1 \ 0] \arg \min_d g \quad (10)$$

$$\min_d g(k+1) = \min (g_i(k+1) + g_{sw}(k+1)) \quad (11)$$

Se entiende por minimización de $g(k+1)$ como el valor de d que más acerque a i_L de $i_{L_{ref}}$.

Los algoritmos MPPT en sistemas fotovoltaicos, utilizan las gráficas I-V, figura 3(a) y P-V, figura 3(b) para observar los valores de referencia. El punto de máxima potencia se define donde $\frac{dP}{dV} = 0$. De ahí se puede escoger el parámetro a variar en el convertidor, ya sea el voltaje, la corriente o el ciclo de trabajo.

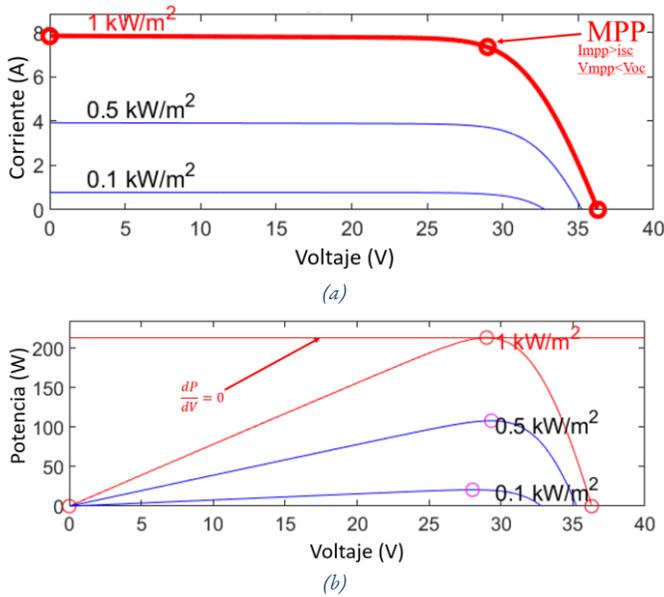


Figura 3. Gráfica I-V y P-V, características de un panel solar.

En este trabajo se mantiene el voltaje a través de un control de la corriente utilizando la irradiancia y la temperatura ambiente para determinar el valor de corriente disponible en la máxima potencia, de este modo el voltaje se mantiene estable modificando el ciclo de trabajo d para ajustar la corriente en función de la irradiancia. Para determinar la corriente de referencia, se utilizó el modelo del panel que calcula la corriente máxima disponible en función de la temperatura ambiente y la irradiancia.

$$i_{Lref}(irr, T) = \frac{Irr}{Irr_{Ref}} \left(i_{isc} - U_{isc}(T - T_{ref}) \right) * 0.95P \quad (12)$$

donde i_{Lref} es la corriente de referencia para el MPC, Irr corresponde a la irradiancia incidente, Irr_{Ref} es la irradiancia en condiciones estándar (1000 W/m²), i_{sc} es la corriente de cortocircuito dada por el panel, U_{isc} es el coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito propio del panel, T la temperatura ambiente medida, T_{ref} la temperatura ambiente en condiciones estándar (25°C) y P es un valor referente a la cantidad de conjuntos de paneles solares que están conectados en serie en el arreglo ponderado al 95%. El valor de ponderación evita que el control siga la corriente de cortocircuito, lo que resultaría en un voltaje y potencia casi nulos, haciendo inviable el MPPT.

En la figura 4 se presenta el diagrama de bloques del algoritmo MPPT propuesto basado en la función lineal hibridada con la técnica MPC. Mediante la medición de la irradiancia incidente y la temperatura ambiente, se genera una corriente de referencia utilizando la función lineal de eqs. (12), ésta alimenta la función de predicción de corriente

$iL(k + 1)$ dada por eqs. (6), misma que se utiliza para compararla con el error y minimizarse en $min g(k + 1)$ usando eqs. (11), con esto se selecciona S , el siguiente estado del convertidor.

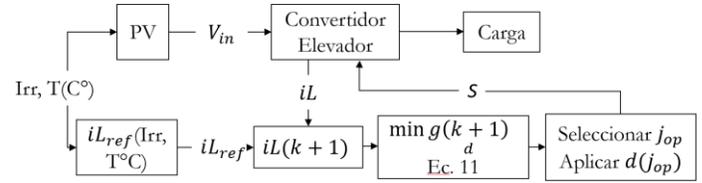


Figura 4. Diagrama de bloques del algoritmo MPPT propuesto.

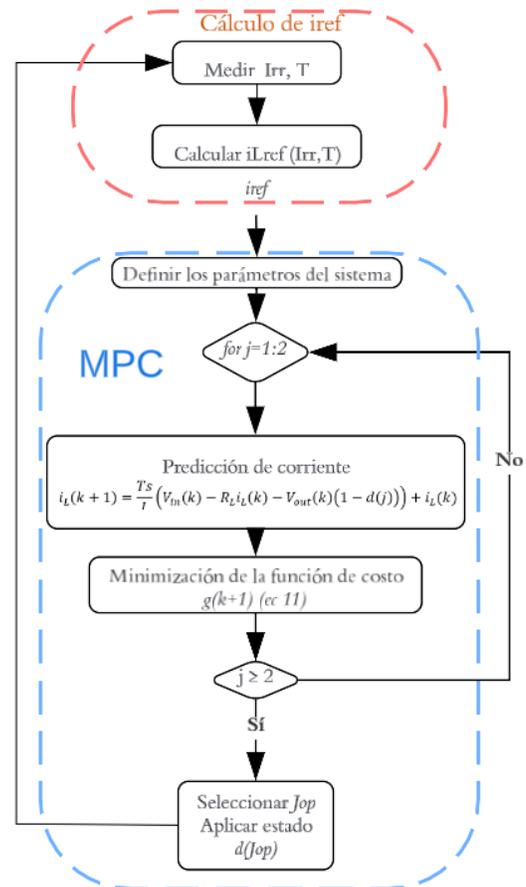


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo MPPT propuesto.

La figura 5 refiere al diagrama de flujo que representa el proceso que sigue el algoritmo MPPT propuesto para gestionar el flujo de corriente y el proceso MPPT del convertidor elevador en el sistema FV. Comienza con la medición de la irradiancia y la temperatura, seguido por el cálculo de $iLref$. Luego, el algoritmo MPC se encarga de predecir la corriente futura, minimizar la función de costo, y seleccionar el índice óptimo jop ($j = [1, 2]$, jop es el valor de j óptimo) para aplicar el estado de conmutación correspondiente, optimizando la entrega de potencia a la carga.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
$P_{m\acute{a}x}$	50729.7 W
C	1000 μF
L	16 mH
RL	0.2 Ω
Arreglos en paralelo	17
Total de paneles	238
T_s	10 μs

Tabla 2. Parámetros del panel solar usado en el sistema FV.

Dato del modulo	Valor
P_m	213.15 W
Celdas por modulo	60
V_{oc}	36.3 V
I_{sc}	7.84 A
V_{mp}	29 V
I_{mp}	7.35 A
U_{Isc}	0.102 %/ $^{\circ}C$

los valores de $P = 0.005$ e $I = 1$. El generador de la señal de modulación q utiliza $P = 0.01$, $I = 1$. Se aplicó una frecuencia de conmutación de 5 kHz en el inversor. Los parámetros P e I representan las ganancias de control proporcional e integral.

Resultados

El sistema se sometió a un ciclo de irradiancia típica, con 0 W/m² de 0 a 0.5 segundos, aumentando hasta 1000 W/m² entre 0.5 y 2 segundos, y luego descendiendo a 0 W/m² entre 2 y 3.8 segundos, manteniéndose constante hasta los 4 segundos de simulación (ver figura 7), además de dos sombras durante el segundo periodo. Esta variación es fundamental, ya que afecta directamente a la generación de potencia en el sistema.

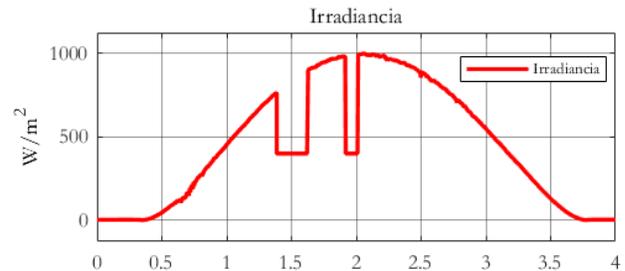


Figura 7. Ciclo de irradiancia para evaluación de rendimiento del algoritmo MPPT propuesto.

Ante la reducción del tipo escalón de 800 a 400 W/m² en la irradiancia, el control reduce la corriente promedio del inductor manteniendo $S = 0$ durante 188.02 μs , que es lo que tarda en alcanzar la referencia (ver figura 8). Caso contrario a la figura 9, donde ante un incremento de 400 a 900 W/m², la corriente promedio del inductor incrementa hasta alcanzar la referencia, manteniendo $S = 1$ durante 400 μs .

Aunque el control gestiona la corriente, el objetivo principal es mantener el voltaje estable, lográndose en 60 ms después de recibir la entrada escalón de irradiancia (ver figura 10).

De acuerdo con Fig. 11, el algoritmo MPPT realiza un correcto seguimiento del punto de máxima potencia. En el primer periodo (de 0s a 0.75s) el control mantiene a $S = 1$, tratando de elevar la corriente promedio del inductor. Una vez que el inductor logra llegar a la referencia, el control incrementa la frecuencia sw, haciendo que $V_{in} = 406V = V_{mp}$, por consiguiente, $V_o = 800V$, y el algoritmo MPPT logra seguir el punto de máxima potencia.

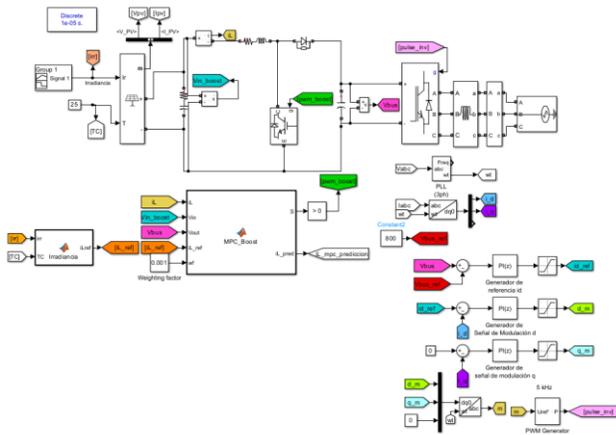


Figura 6. Algoritmo MPPT propuesto para el sistema FV en SIMULINK.

De acuerdo con figura 6, el algoritmo propuesto para el sistema FV se implementó en SIMULINK con el objetivo de transferir potencia a la red. Por lo que se utilizó un inversor de 3 fases controlado por un PI discreto que gestiona el flujo de corriente a la red. La salida del inversor lleva un filtro L de 2.26 mH para disminuir el rizo de corriente. El Control $PI(z)$ que genera la referencia i_d se configura con los valores $P = 0.15$ e $I = 80$. El generador de la señal de modulación d utiliza

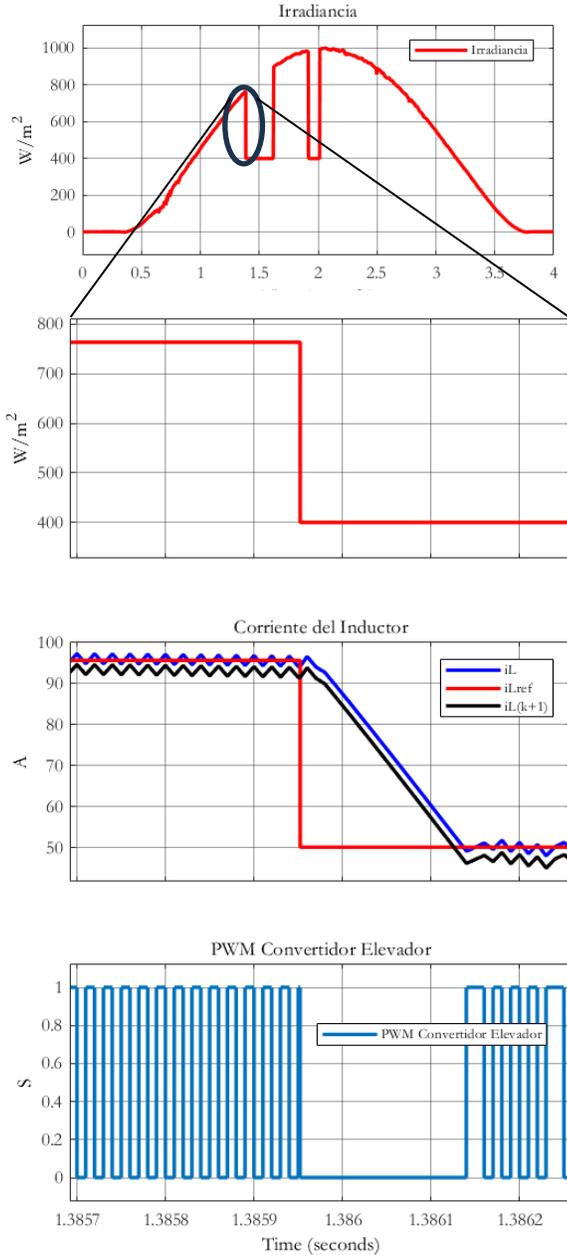


Figura 8. Respuesta del algoritmo MPPT propuesto ante una reducción del tipo escalón en la irradiancia.

Durante los cambios del tipo escalón, se muestra un sobre impulso en P_{pv} , debido a que el control de voltaje es 30 veces más lento que el control de corriente. Como resultado de esto, el proceso MPPT registra una eficiencia cercana al 99%.

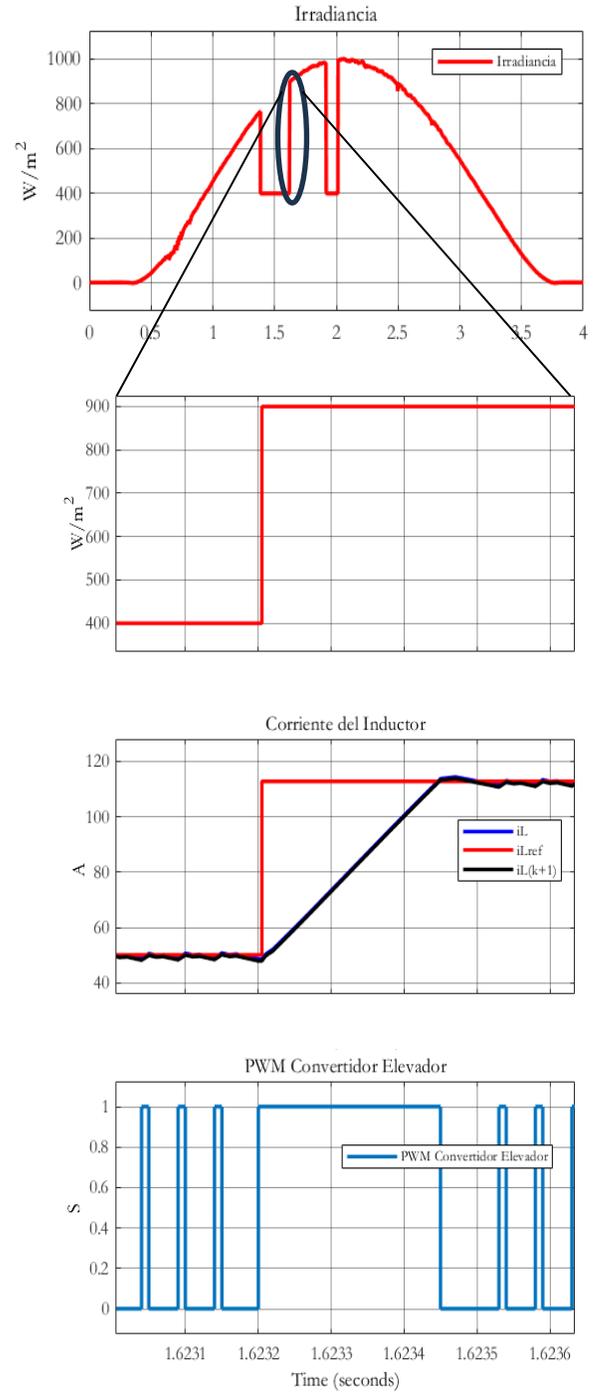


Figura 9. Respuesta del algoritmo MPPT propuesto ante un incremento del tipo escalón en la irradiancia.

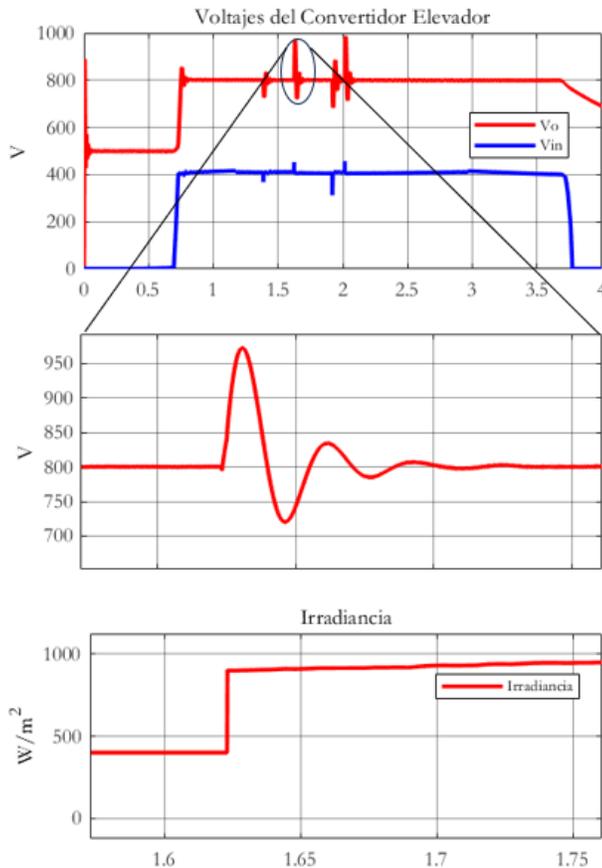


Figura 10. Control de voltaje alcanzado vía el algoritmo MPPT propuesto ante una entrada escalón.

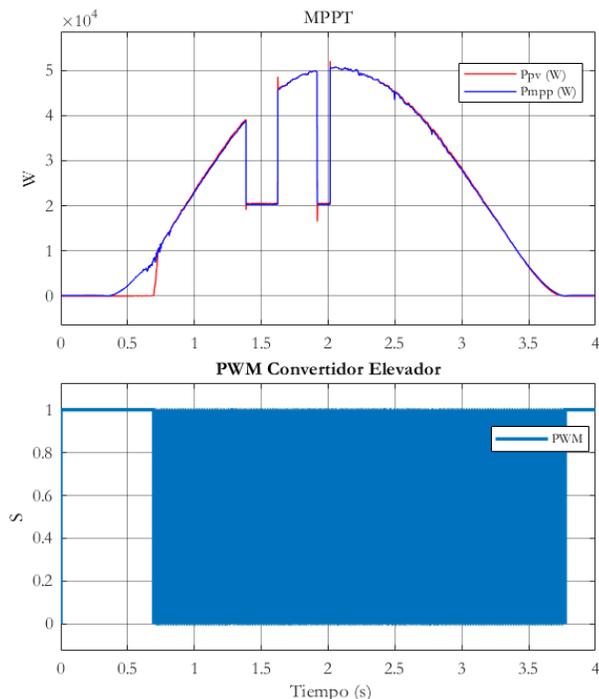


Figura 11. Proceso MPPT alcanzado con el algoritmo propuesto.

Conclusiones

Este trabajo presentó un algoritmo MPPT basado en una función lineal hibridada con la técnica MPC. La función lineal genera la corriente de referencia y el MPC se encarga de rastrearla, optimizando así el flujo de corriente y el proceso MPPT en un convertidor elevador de un sistema fotovoltaico. El algoritmo logró un tiempo de respuesta de 2 ms en el control de corriente y 60 ms en el control indirecto de voltaje, lo que garantiza un proceso MPPT eficiente incluso ante cambios bruscos en la irradiancia. La eficiencia del proceso MPPT alcanzada fue cercana al 99%, validando la efectividad del enfoque propuesto en el algoritmo MPPT en términos de velocidad de respuesta y robustez del proceso MPPT frente a condiciones variables de irradiancia solar.

Referencias

- [1] Erdal Irmak & Naki Güler: A model predictive control-based hybrid MPPT method for boost converters International Journal of Electronics. 2019.
- [2] Hernanz, J. R., Guede, J. M. L., Barambones, O., Zulueta, E., & Gamiz, U. F.. Novel control algorithm for MPPT with boost converters in photovoltaic systems. International Journal of Hydrogen Energy, 42(28), 17831–17855. 2017.
- [3] Qian, Q., Yu, J., Su, C., Sun, W., & Lu, S. (). A LLC resonant converter with dual resonant frequency for high light load efficiency. International Journal of Electronics. 104(12), 2017. 2033–2047
- [4] Dinamarca, A. Aprendizaje y Análisis de Redes Neuronales Artificiales Profundas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Cuyo. 2018
- [5] De Los Reyes-Suárez, L., Mares Gardena, A. E., Analysis of a Multiport DC/DC Converter used for energy extraction from a photovoltaic system. Memorias del 2023 Congreso Nacional de Control Automático. 25-27 de octubre, 2023.
- [6] F. Garcia-Torres, A. Zafra-Cabeza, C. Silva, S. Grieu, T. Darure, y A. Estandequeiro, “Model Predictive Control for Microgrid Functionalities: Review and Future Challenges”, Energies (Basel), vol. 14, núm. 5, p. 1296, feb. 2021.
- [7] Seo, S. W., Kim, Y., & Choi, H. H. Model predictive controller design for boost DC–DC converter using T–S fuzzy cost function. International Journal of Electronics, 104(11), 1838–1853. 2017
- [8] Priya, T. H., & Parimi, A. M. Design of adaptive perturb and observe-fuzzy MPPT controller for high voltage gain multilevel boost converter. IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner. 2016
- [9] Metry, M., Shadmand, M. B., Balog, R. S., & Abu-Rub, H. MPPT of photovoltaic systems using sensorless currentbased model predictive control. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2), 1157–1167. 2017

[10] Torres, Carlos. ZnO como material prometedor para celdas solares 1 st Carlos Torres. 2020

[11] N. P V, C. M, R. P. Eldho and S. Michail, "Review on Role of Power Electronics in Integration of Renewable Energy Sources with Micro grid," 2022 International Conference on Smart and Sustainable Technologies in Energy and Power Sectors (SSTEPS), Mahendragarh, India, 2022, pp. 27-32.

[12] Danandeh, M. A., & Mousavi, S. M. G. (2018). Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(3), 2743–2767.).

Semblanza Autores



Ingeniero Mario Castro Torres. Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica de Sinaloa, estudiante de la Maestría en Ciencias Aplicadas por la Universidad Politécnica de Sinaloa, con el proyecto de tesis "Estudio Comparativo de Técnicas de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red".



Aldo Noe Higuera Juárez. Doctor en Ciencias e Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Sus áreas de investigación son: Control y gestión de la energía, Electrónica de potencia. Actualmente se desempeña en el programa de mecatrónica como profesor investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa y en Maestría en Ciencias Aplicadas de la misma institución.



Alejandro Lizárraga Lizárraga. Doctor en Ciencias e Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Actualmente se desempeña en el programa de mecatrónica como profesor investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa y en Maestría en Ciencias Aplicadas de la misma institución. Sus áreas de investigación son: Diseño y optimización de convertidores electrónicos de potencia, Administración y uso eficiente de la energía eléctrica.



Dr. David Ricardo López Flores. Ing. en Electrónica con Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica. Profesor de tiempo completo en TecNM – Campus Chihuahua, donde imparte clases en los programas de Ing. Electromecánica y la División de Estudios de Posgrado e Investigación. Sus intereses de investigación se centran en áreas clave como unidades de control y acondicionamiento de sistemas solares y eólicos con base en técnicas de control convencional y no convencional.



GEOVOLTAICA

Revista de Energía y Sostenibilidad