

Diseño de un convertidor elevador para un arreglo fotovoltaico

Cristhiam Daniel Campos Julca

Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales

6 de diciembre de 2021

Resumen

El presente trabajo aborda de una manera didáctica el diseño de un convertidor elevador que alimentará una carga específica después de haber sido alimentado por un arreglo fotovoltaico tomando en cuenta la variación de la irradiación para diversos lapsos de tiempo, a una temperatura constante durante dicho intervalo. Para realizar el diseño, se realiza previamente el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico a través del algoritmo de Perturbe & Observe. El diseño se corrobora haciendo uso de Simulink en diversos escenarios para determinar la eficiencia del diseño planteado.

KEYWORDS: *Panel fotovoltaico (PV), Seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), Algoritmo Perturbe & Observe (P&O), Convertidor elevador (boost)*

1. Introducción

Actualmente el uso de energías renovables en diversos ámbitos de la sociedad está teniendo un crecimiento considerable, por ser fuentes alternativas y limpias que permiten el suministro de energía reduciendo el impacto de la contaminación ambiental. [1]. Dentro de las soluciones que se presentan hoy en día, está sin lugar a duda la energía solar, considerándose como la alternativa más viable debido a sus ventajas con respecto a los otros tipos de energía. [2]. La energía captada por el sol puede ser entregada en forma de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos; sin embargo, las características eléctricas en los terminales de los paneles no son suficientes para alimentar las cargas convencionales debido a los bajos niveles de tensión que presentan [3], y a los factores ambientales a los cuáles están expuestos (irradiación y temperatura variable). Ante esta problemática, el presente trabajo pretende explicar la importancia del punto de máxima potencia (MPP) y el uso del algoritmo de Perturbe & Observe para alcanzar dicho punto. Así pues, se puede trabajar en torno al objetivo que consiste en diseñar un convertidor elevador y mostrar la simulación del sistema a través de Simulink.

2. Modelamiento del panel fotovoltaico

La estructura básica de la celda fotovoltaica consta de un módulo fotovoltaico (SPVM), que a su vez conforman un arreglo fotovoltaico (SPVA), así como se muestran en la figura 1. Estas celdas solares están equipadas con materiales semiconductores, conocidos como diodos se-

miconductores, cuyas uniones P-N se mantienen a la luz solar para obtener la energía eléctrica. [4].

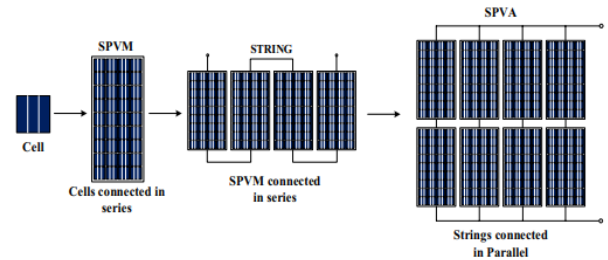


Figura 1: Estructura de un arreglo fotovoltaico

El funcionamiento de una celda fotovoltaica se basa en el principio fundamental del efecto fotoeléctrico, el cuál, puede ser definido como un fenómeno en el que un electrón es expulsado de la banda conductora como resultado de la materia que absorbe la luz solar de una determinada longitud de onda. [5].

2.1. Modelo matemático

La tarea principal del modelamiento consiste en producir una gráfica que represente el comportamiento de la corriente de salida y la potencia del SPVA, con respecto a la tensión en diferentes condiciones ambientales (temperatura e irradiación). [6].

El modelo del panel está basado en un circuito equivalente no ideal, que incluye las pérdidas dadas por las resistencias parásitas, conocido como el modelo de los cinco parámetros, donde la celda PV se modela como fuente de corriente y está conectada en paralelo al diodo que emula el fenómeno de polarización. Las resistencias

R_s y R_{sh} están conectadas en serie y paralelo respectivamente. Este modelo es utilizado debido a su buena aproximación. [7].

El modelo planteado se representa a través del circuito que se muestra en la figura 2, en donde se determina la siguiente ecuación partiendo de la Ley de Kirchhoff:

$$I_{PV} = I_L - I_D - I_{R_{sh}}$$

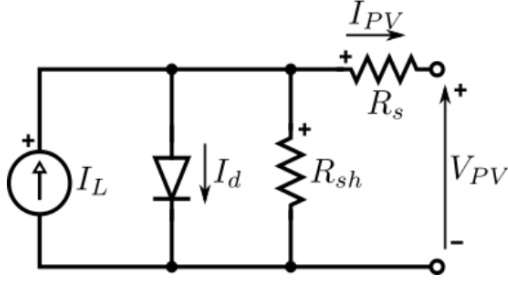


Figura 2: Modelo de los cinco parámetros

Donde I_L representa la fuente de corriente dada por la intensidad lumínica, I_D es la corriente que pasa por el diodo y $I_{R_{sh}}$ corresponde a la corriente que pasa por la resistencia R_{sh} . [8]. Estas corrientes permiten representar el modelo del panel fotovoltaico de la siguiente manera:

$$I_{PV} = I_L - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{N_s a V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

2.2. Panel Fotovoltaico Sunset PC-72

El panel utilizado en el presente trabajo es el Sunset PC-72, el cuál cuenta con 72 celdas de silicio policristalino. Se debe tener en cuenta la configuración de los paneles, bien sea en paralelo o en serie; es decir, si son ubicados en paralelo se eleva la corriente, y si son ubicados en serie se eleva el voltaje. En el cuadro 1 se observan los datos proporcionados por el panel Sunset PC a condiciones estándar de prueba, a una temperatura de 25°C y una radiación de 1000 $\frac{W}{m^2}$.

Dado que se requiere 4073 W de potencia, se diseña un arreglo de cuatro paneles en serie y tres en paralelo. Usando Simulink se pueden visualizar las curvas características del arreglo, ingresando los parámetros mencionados en el cuadro 1. En la figura 3 y 4 se observan las curvas para una temperatura de 25°C y diferentes valores de irradiancia ($\frac{W}{m^2}$).

P_{max}	340 W
V_{oc}	47.4 V
V_{mpp}	38.4 V
I_{sc}	9.35 A
I_{mpp}	8.84 A
N_s	72
Coefficiente de temperatura	0.037 %/K
Coefficiente de temperatura	-0.32 %/K
R_s	0.39 Ω
R_{sh}	545.82 Ω

Cuadro 1: Parámetros panel solar Sunset PX [9]

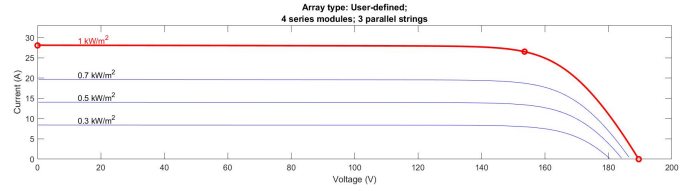


Figura 3: Curva VI a una temperatura de 25°C

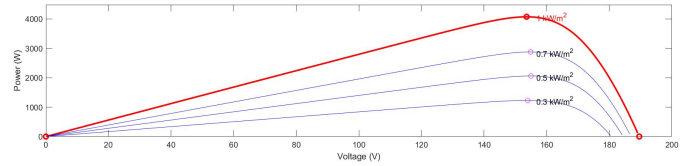


Figura 4: Curva PV a una temperatura de 25°C

3. Modelamiento del convertidor boost

Cuando se habla de un sistema fotovoltaico completo conectado a la red, se debe tener en cuenta diferentes etapas desde la producción de energía eléctrica en los paneles solares hasta la correcta entrega de la energía a la red como se muestra en la figura 5. Para el presente trabajo, se centrará el estudio en el convertidor Boost.

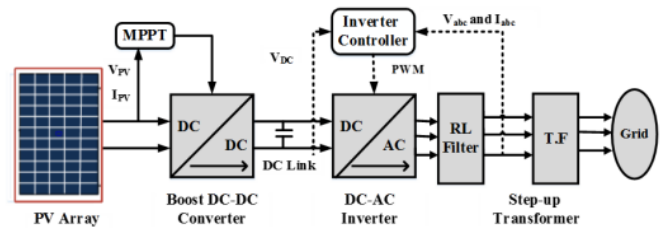


Figura 5: Diagrama simplificado de la red conectada del sistema fotovoltaico.

El circuito eléctrico de dicho convertidor se muestra en la figura 6, y se conoce como elevador ya que la tensión de salida es mayor que la tensión de entrada. Está compuesta de un inductor elevado, un interruptor electrónico, un

diodo, un filtro de salida capacitancia y la carga.[10].

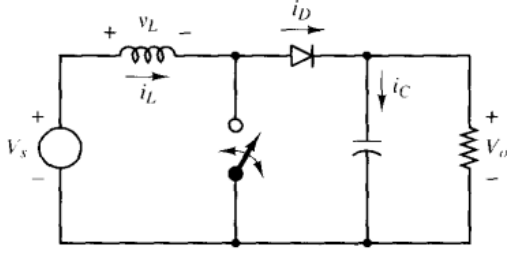


Figura 6: Circuito de un convertidor elevador

3.1. Diseño del convertidor

Para el análisis del primer ejemplo se hacen las siguientes suposiciones:

1. El circuito opera en régimen permanente.
2. El periodo de conmutación es T y el interruptor está cerrado un tiempo DT .
3. La corriente en la bobina es permanente.
4. El condensador es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante.
5. Los componentes son ideales.

Como primer ejemplo, el convertidor que se va a diseñar debe presentar una salida de 330 V a partir de una fuente de 153.6 V. Esta tensión de entrada es tomada en cuenta a partir de la tensión en el punto de máxima potencia de la figura 4 a una irradiancia de 1000 W/m^2 . La corriente en la bobina será permanente y el rizado de la tensión de salida debe ser menor que el 1 por ciento. La carga es una resistencia de 100Ω y se supone que los componentes son ideales.

En primer lugar, se determina el ciclo de trabajo:

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} = 1 - \frac{153,6}{330} = 0,5345$$

Si seleccionamos una frecuencia de conmutación de 25 kHz, superior al rango auditivo, podemos obtener la inductancia mínima para corriente permanente:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} = \frac{0,5345(1-0,5345)^2 100}{2(25000)} = 231,64 \mu H$$

Con el fin de mantener un margen para asegurar corriente permanente, definimos $L = 250 \mu H$. Se debe tener en cuenta que L y f se seleccionaron arbitrariamente, y que existen otras combinaciones que producirán corriente permanente.

Ahora:

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{153,6}{(1-0,5345)^2 \cdot 100} = 7,0885 \text{ A}$$

$$\frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s D T}{2L} = \frac{(153,6)(0,5345)}{(2)(250)(10)^{-6}(25000)} = 6,5679 \text{ A}$$

$$I_{max} = 7,0885 + 6,5679 = 13,6564 \text{ A}$$

$$I_{min} = 7,0885 - 6,5679 = 0,5206 \text{ A}$$

Finalmente se calcula el rizado de la tensión de salida:

$$\frac{\Delta V_o}{v_o} = \frac{D}{RCf} < 1\%$$

$$C > \frac{D}{Rf \left(\frac{\Delta V_o}{v_o} \right)} = \frac{0,5345}{(100)(25)(10)^3(0,01)} = 21,38 \mu F$$

3.2. Simulación del convertidor elevador

3.2.1. Convertidor boost con tensión constante

Partiendo de los datos obtenidos en la sección anterior, se procede a simular el comportamiento de la corriente y la tensión en los elementos que conforman el circuito usando Simulink como se muestra en la figura 7. Las formas de onda de la tensión y la corriente del convertidor elevador son mostradas en la figura 8.

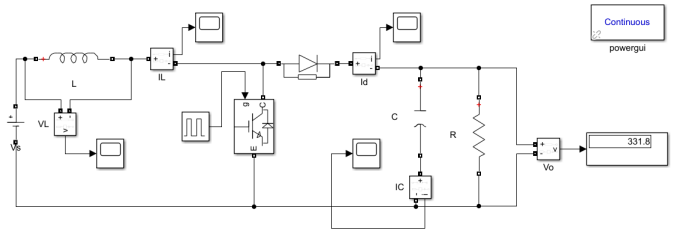


Figura 7: Esquema en simulink del circuito elevador en lazo abierto

3.2.2. Convertidor boost con PV

Una vez comprobado nuestro diseño a través de Simulink, ahora realizamos una modificación en la fuente de entrada. Esta vez se simula el comportamiento del circuito utilizando el arreglo fotovoltaico Sunset PC-72 como se observa en la figura 9 con las especificaciones del cuadro 1. Para la simulación se toma como entrada una temperatura de 25°C y una radiación de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. El comportamiento de las formas de onda mostradas en la figura 8 varían de acuerdo a la figura 10. Además en la figura 11 se observa el comportamiento de la tensión y corriente del arreglo PV y de la carga.

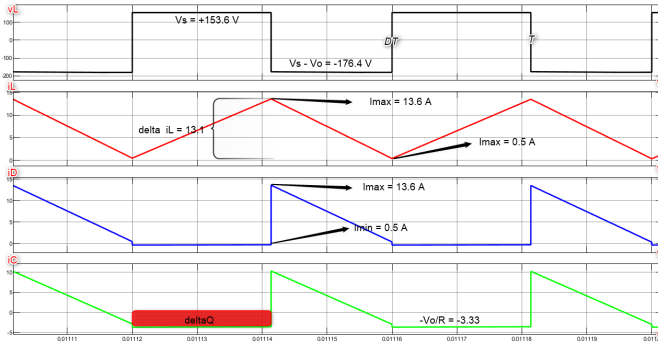


Figura 8: Formas de onda del convertidor elevador: Tensión en la bobina, corriente en la bobina, corriente en el diodo y corriente en el condensador.

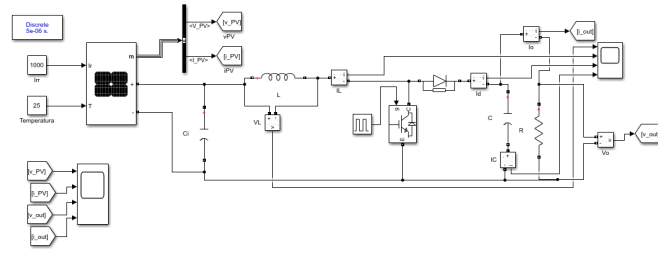


Figura 9: Circuito del convertidor elevador utilizando un arreglo PV

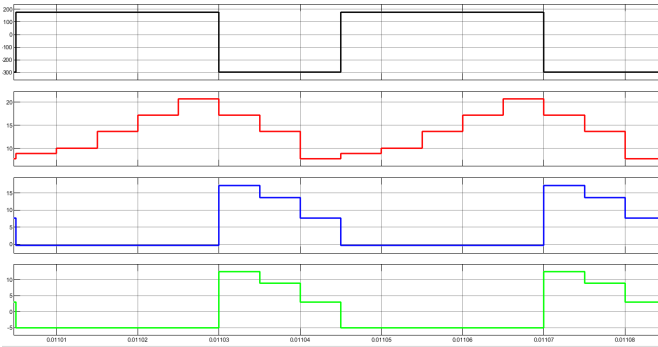


Figura 10: Formas de onda del convertidor elevador: Tensión en la bobina, corriente en la bobina, corriente en el diodo y corriente en el condensador. Utilizando el arreglo PV Sunset PC-72

4. Seguimiento del punto de máxima potencia

Una de las tareas más importantes de los sistemas fotovoltaicos es extraer de forma confiable y rápida la máxima energía solar disponible en diversos escenarios ambientales. Esta tarea se conoce como seguimiento de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés). [11].

Se sabe que la mayoría de los algoritmos de MPPT pueden tener un rendimiento aceptable para sistemas fotovoltaicos que trabajen bajo irradiancia solar uniforme,

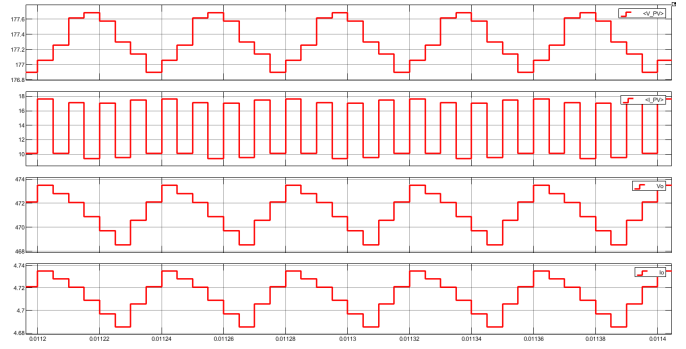


Figura 11: Formas de onda de la tensión PV, la corriente PV, la tensión en la carga y la corriente en la carga.

no obstante el MPPT se vuelve complejo en condiciones de sombreado parcial, debido a que la tensión de salida del sistema se vuelve altamente no lineal en tales condiciones. [12].

Dentro de los algoritmos mas comunes para MPPT son: Perturb and Observe (P&O), Hill climbing (HC), y incremental conductance (INC). Estos a menudo pueden tener un rendimiento decente en condiciones uniformes, ya que sólo hay un MPP que varía con la irradiancia solar o con la temperatura.

4.1. Algoritmo MPPT basado en P&O

El algoritmo de optimización P&O consiste en variar la tensión de referencia o la corriente de entrada del convertidor. Después, se mide la cantidad de potencia convertida desde el panel. Si es mayor que la potencia medida anteriormente, la referencia de tensión se incrementa constantemente en la misma proporción, y si no se disminuye. Estos pasos se toman continuamente para encontrar el MPPT óptimo. [13].

La tensión en los terminales del sistema fotovoltaico se ve perturbada en cada ciclo del MPPT a intervalos de muestreo T_s , por lo que un vez alcanzado el punto de máxima potencia, el algoritmo P&O oscilará alrededor de este punto resultando una pérdida de potencia del sistema PV, especialmente donde las condiciones atmosféricas varíen lentamente. En la figura 12 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo P&O. [14]

La figura 13 muestra la potencia de salida PV con respecto a la tensión de la carga para una radiación específica. Como se puede observar, existen dos ubicaciones para movilizarse de un punto A ($\frac{dP}{dV} > 0$) hacia un punto B ($\frac{dP}{dV} < 0$). Cuando se utiliza un tamaño de paso pequeño de la tensión, se alcanzará oscilaciones de estado estacionario con un resultado de respuesta MPPT lenta. [15].

En la figura 14 se puede observar el esquema de funcionamiento del método de seguimiento del punto de máxima potencia para nuestro circuito (En el esquema se representan elementos ideales).

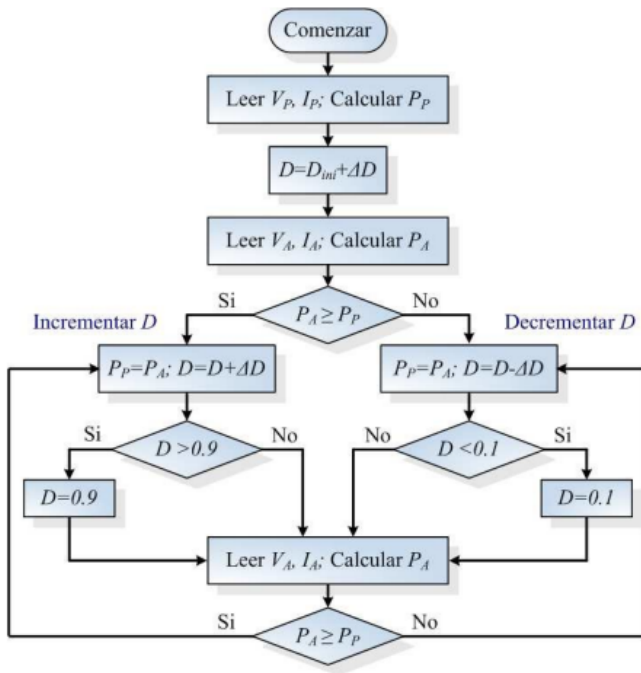


Figura 12: Diagrama de flujo del algoritmo P&O [14].

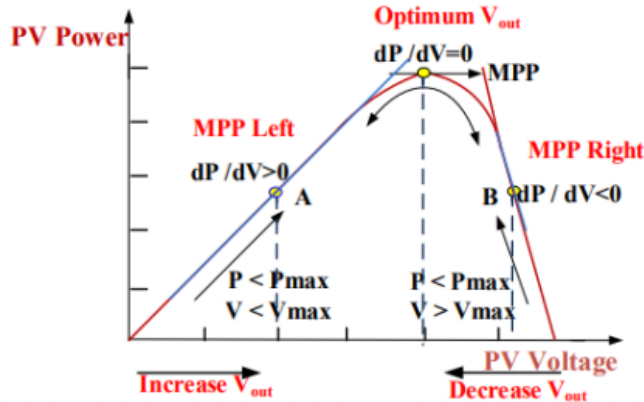


Figura 13: Modo de operación algoritmo P&O.

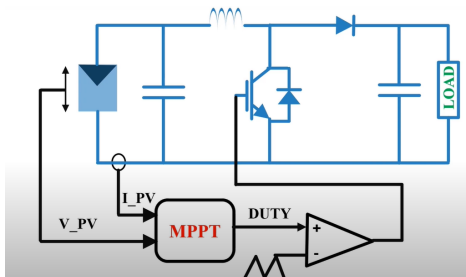


Figura 14: Implementación MPPT

4.2. Programación del algoritmo P&O

A continuación se muestra un script que se implementará como una función del algoritmo P&O para Simulink.

```
function duty = MPPT_algorithm(
    vpv, ipv, delta)

duty_init = 0.1;
% min and max value are used to
    limit duty between 0 and 0.85
duty_min = 0;
duty_max = 0.85;

persistent Vold Pold duty_old;
% persistent variable type can
    be store the data
% we need the old data by obtain
    difference between
% old and new value
if isempty(Vold)
    Vold = 0;
    Pold = 0;
    duty_old = duty_init;
end
P = vpv*ipv; % power
dV = vpv - Vold; % difference
    between old and new value
dP = P - Pold; % difference
    between old and new power

% The algorithm is below search
    the dP/dV=0
% if the derivative equal to
    zero
% duty will not change
% if old and new power not equal
% &
% pv-voltage bigger than 30V
% the algorithm will works
if dP ~= 0 && vpv > 30
    if dP < 0
        if dV < 0
            duty = duty_old - delta;
        else
            duty = duty_old + delta;
        end
    else
        if dV < 0
            duty = duty_old + delta;
        else
            duty = duty_old - delta;
        end
    end
else
    duty = duty_old
end

% the below if will limits the
    duty between min and max
```

```

if duty >= duty_max
duty = duty_max;
elseif duty < duty_min
duty = duty_min;
end

% stored data
duty_old = duty;
Vold = vpv;
Pold = P;

```

5. Resultados de la simulación y discusión

La representación como fuente de voltaje del capacitor de carga interactuando con un inversor conectado a la red, es el modelo más común para conexiones de dc con un inversor a lazo cerrado, considerando resistencias parásitas en los elementos pasivos del convertidor dc/dc y en el capacitor de carga, el esquema eléctrico usado se presenta en la figura 15.

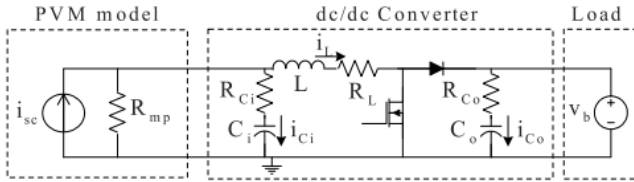


Figura 15: Modelo considerando pérdidas parásitas y fuente de voltaje como capacitor de carga.

Como se mencionó anteriormente, en la figura 4 se puede observar que existen puntos en los cuáles las gráficas de potencia alcanzan un valor máximo denominado MPP, allí se garantiza que para estos valores de potencia el módulo fotovoltaico esté entregando la máxima potencia disponible, y su posición varía dependiendo de las condiciones de irradiancia y temperatura.

Para nuestro modelo más realista, introduciremos en la entrada diferentes valores de irradiancia en diferentes lapsos de tiempo de 0.25 segundos de la siguiente manera: [0, 0, 300, 300, 500, 700, 1000, 1000, 500, 500, 0, 0]. En la figura 16 tenemos la simulación del circuito en donde la máxima potencia es de 4073.47 W a una temperatura de 25°C y una radiación de 1000 $\frac{W}{m^2}$.

Ahora, necesitamos una señal de ciclo de trabajo para determinar la relación de éste con la de PWM. Debido a que queremos controlar la potencia dependiendo del punto de potencia máxima, que a su vez depende de la irradiancia.

El algoritmo MPPT determina los MPPs por la búsqueda de la derivada $\frac{dP}{dV} = 0$. En la figura 17 se muestra el modelo con la función MPPT algorithm incluida.

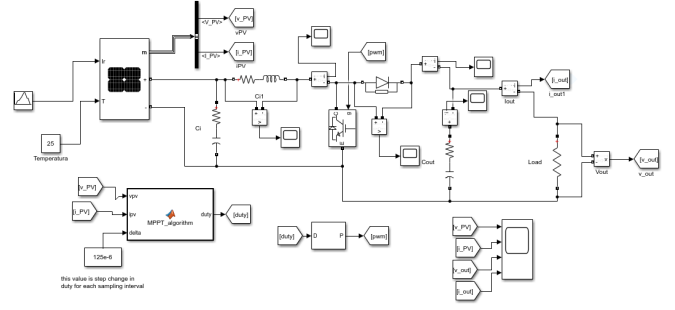


Figura 16: Convertidor boost sin MPPT

Y en la figura 18 se puede observar el comportamiento de la corriente y la tensión del panel y de la carga.

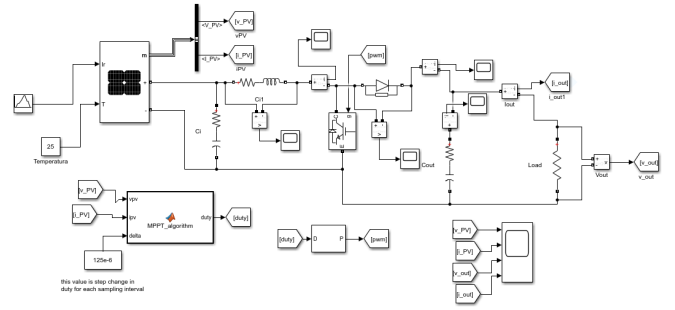


Figura 17: Convertidor boost con MPPT

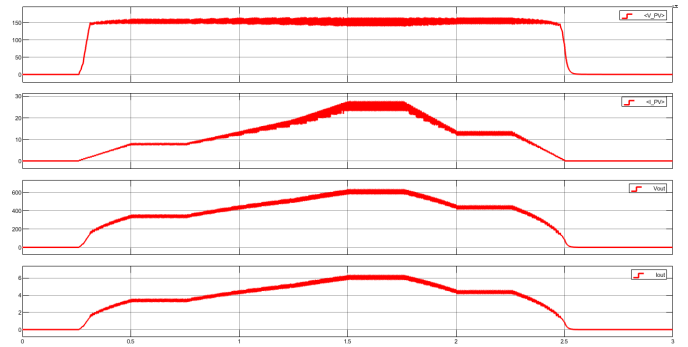


Figura 18: Comportamiento de V_{PV} , I_{PV} , V_o , I_o

Ahora podemos evaluar el comportamiento de la potencia. Para ello necesitamos una curva de potencia ideal para calcular la eficiencia del algoritmo MPPT. En la figura 19 se observan los bloques usados en simulink. Y en la figura 20 se muestra la comparación de las curvas de potencia del PV.

Con estos resultados se puede calcular la eficiencia del modelo obteniéndose el resultado mostrado en la figura 23. La eficiencia se ve aproximadamente mayor a 0.96.

Finalmente podemos comprobar la eficiencia general del sistema.

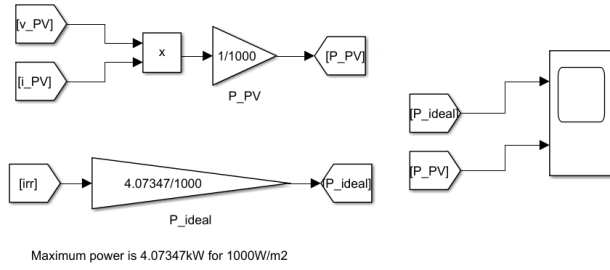


Figura 19: Bloques para la comparación de la potencia real con la potencia ideal del PV

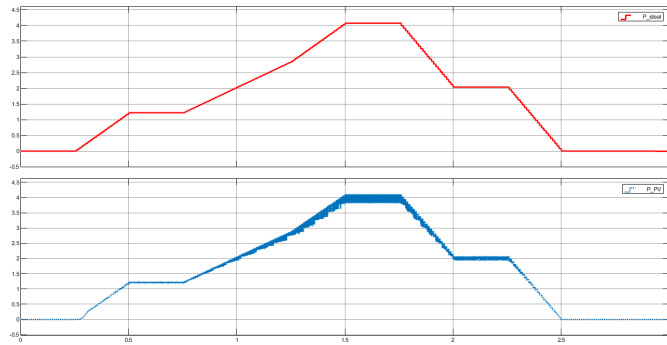


Figura 20: Comparación de la potencia real con la potencia ideal del PV

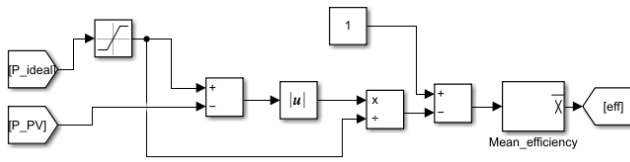


Figura 21: Bloque para calcular la eficiencia media de la potencia del modelo propuesto

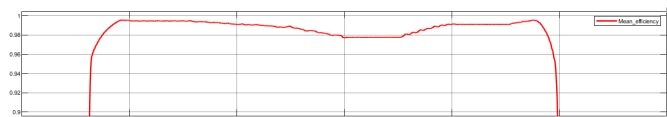


Figura 22: Eficiencia media de la potencia del modelo propuesto

6. Conclusiones

El algoritmo implementado para el MPPT en el convertidor boost presenta una respuesta satisfactoria ya que la eficiencia del modelo es aproximadamente es del 96 %, lo que fundamenta la importancia del uso de algoritmos para aprovechar la máxima potencia entregada por el sistema fotovoltaico y que pueda mitigar el problema de la no linealidad del modelo matemático que rige este sistema. Se recomienda proceder con el desarrollo experimental que pueda corroborar dichos resultados. Así mismo simular este sistema con otros algoritmos MPPT

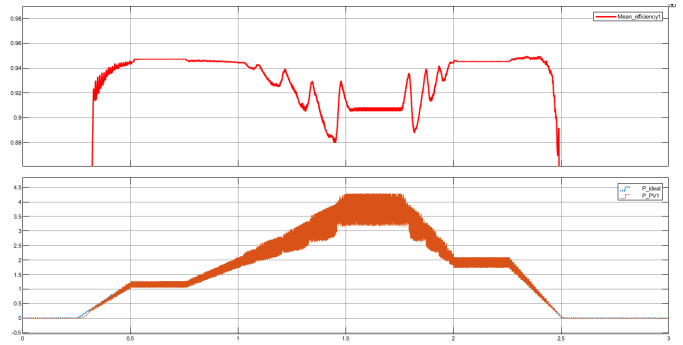


Figura 23: Eficiencia de la potencia de la carga

para verificar el más apropiado. Finalmente se recomienda variar el ciclo útil en lazo abierto para verificar que la potencia entregada sea la máxima requerida.

Referencias

- [1] H. Diaz Narváez, F. Diez Cardona, *et al.*, “Análisis, modelado, simulación y validación de un sistema de generación de energía solar autónomo caso: Universidad autónoma de occidente,” B.S. thesis, Universidad Autónoma de Occidente, 2007.
- [2] F. A. L. González and M. M. H. Cely, “Estudio del potencial eólico y solar de cúcuta, norte de santander,” *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, no. 22, pp. 27–33, 2013.
- [3] A. P. García, C. A. V. Herrera, and I. T. Chávez, “Módulo robótico de seguimiento solar usando mppt supervisado y controlado vía ethernet,” *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, no. 23, pp. 112–119, 2017.
- [4] R. W. Kotla and S. R. Yarlagadda, “Mathematical modelling of spv array by considering the parasitic effects,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [5] R. Sreega, K. Nithyananthan, and B. Nandhini, “Design and development of automated solar panel cleaner and cooler,” *Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 9, pp. 186–197, 2017.
- [6] S. Shongwe and M. Hanif, “Comparative analysis of different single-diode pv modeling methods,” *IEEE Journal of photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 938–946, 2015.
- [7] J. Vera and M. Ferreira, “Maximum power point tracker shaded condition,” in *Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana*, 2013.
- [8] M. Rivera Montezuma, *Control por modos deslizantes aplicado a un inversor de fuente de corriente monofásico conectado a la red*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [9] ENF Solar – Solar Companies and Products, *Sunset PX-72*, 1 2016.
- [10] P. Pradipkumar, S. Ajaykumar, B. Vaidya, *et al.*, “Design of dc/dc boost converter for the application of photovoltaic system,” *Global Research Analysis*, vol. 2, no. 4, 2013.
- [11] S. Motahhir, A. El Hammoui, and A. El Ghzi-zal, “The most used mppt algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm,” *Journal of cleaner production*, vol. 246, p. 118983, 2020.
- [12] B. Yang, T. Zhu, J. Wang, H. Shu, T. Yu, X. Zhang, W. Yao, and L. Sun, “Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of pv systems under partial shading condition,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 268, p. 121983, 2020.
- [13] A. Tobón, J. Peláez-Restrepo, J. P. Villegas-Ceballos, S. I. Serna-Garcés, J. Herrera, and A. Ibeas, “Maximum power point tracking of photovoltaic panels by using improved pattern search methods,” *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1316, 2017.
- [14] M. G. Molina, P. E. Mercado, and P. E. Wiernes, “Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica,” *Avances en energías renovables y medio ambiente*, vol. 11, 2007.
- [15] S. A. M. Abdelwahab, A. M. Hamada, and W. S. Abdellatif, “Comparative analysis of the modified perturb & observe with different mppt techniques for pv grid connected systems,” *International journal of renewable energy Research*, vol. 10, no. 1, pp. 55–164, 2020.