

Control del convertidor DC/DC dual intercalado para el seguimiento del punto de máxima potencia en generadores fotovoltaicos

Laura Marcela Delgado Blanco y Daniela Andrea Duarte Mejía

Proyecto de grado para optar al título de:

Director

María Alejandra Mantilla Villalobos

PhD. en Ingeniería

Codirector

Fausto Osorio Silva

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

A mis padres por brindarme su amor y apoyo total en mi formación académica.

A mis hermanas por ser mi ejemplo a seguir y lucha para alcanzar mis metas.

A mi novio por creer en mi capacidad y brindarme su amor, comprensión y cariño.

A mi abuelita Juana quien no pudo ver la culminación de mi proceso, sin embargo me acompaña desde el cielo y sus recuerdos continúan en mi.

A mi amiga y compañera de tesis por su paciencia, constancia y apoyo incondicional para culminar este proceso.

A mi directora de tesis por la ayuda y el conocimiento que nos brindó durante la realización de este trabajo de grado.

A mis compañeros y amigos que de una u otra manera han estado cerca de mi y me han aportado grandes cosas en mi vida.

Laura Marcela Delgado Blanco

A Dios, quien me ha dado la fuerza para superar todas las dificultades y con su sabiduría infinita me guio para poder culminar mis estudios universitarios.

Al ángel más lindo que hay en el cielo, mi madre Amparo Mejía Aranda, por ser mi mayor motivación e inspiración y a pesar de que desafortunadamente no puede estar físicamente conmigo, sé que este triunfo hubiese sido tan especial para ella como lo es para mí.

A mi padre David Eduardo Duarte Bolaños, que siempre ha sido un hombre dedicado a mí, me ha escuchado, me ha aconsejado y me ha dado coraje, fortaleza, aliento y el amor que he necesitado en todo momento, haciendo hasta lo imposible porque yo logre cumplir mis objetivos y mis sueños, te amo pandita.

A mi familia, especialmente a mi madrastra Claudia María Gutiérrez Arciniegas y a mi hermana María José Mosquera Gutiérrez, por creer siempre en mí, tenerme en sus oraciones y brindarme su apoyo incondicional.

A mi amiga y compañera de trabajo de grado Laura Marcela Delgado Blanco, por su paciencia, esfuerzo, cariño y apoyo vital para la realización de este sueño.

A nuestra directora de trabajo de grado María Alejandra Mantilla Villalobos, por su orientación, compromiso, disposición y ayuda para la realización de este proyecto.

A mi querido profesor Carlos Hernán Cruz Martínez, por orientarme a estudiar ingeniería eléctrica y ver tanto potencial en mí.

A mis amigos Alejandro Hernández, Jesús Montes y Ray Gómez, por manifestarme en todo momento su lealtad y apoyo en mis momentos difíciles.

A mis mejores amigas Tatiana Pinto, Lorena Mojica, Nicole Quintero, por brindarme siempre su apoyo moral y emocional con sus palabras de aliento, en los momentos que mas lo necesitaba, y ofrecerme un segundo hogar.

A mis docentes, que ayudaron en mi formación profesional y que con sus experiencias hicieron que soñara cada día más con ser ingeniera electricista.

A mis familiares, amigos, compañeros y personas que hicieron parte de este proceso y estuvieron conmigo, dándome la mano, un abrazo o una palabra en cada una de mis caídas y alegrías.

Daniela Andrea Duarte Mejía.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Convertidor DC/DC.....	17
1.1 Topología elevadora.....	17
1.2 Convertidor DC/DC elevador dual intercalado.....	20
2. Sistema de Control.....	25
2.1 Control PI.....	25
2.2 Algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas solares fotovoltaicos.....	26
2.3 Algoritmo perturbar y observar (P&O).....	26
2.4 Algoritmo perturbar, observar y comparar (POC).....	28
3. Desarrollo de la simulación	30
4. Resultados y Análisis.....	36
4.1 Escenario de simulación con carga balanceada	36
4.2 Escenario de simulación con carga desbalanceada.....	48
5. Conclusiones.....	61
Referencias Bibliográficas	62
Apéndices.....	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema Fotovoltaico Típico.....	14
Figura 2. Inversor multinivel con diodos anclados al neutro [Ilustración].....	16
Figura 3. Esquema del circuito del convertidor elevador	17
Figura 4. Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado.....	18
Figura 5. Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto.....	19
Figura 6. Circuito para la topología propuesta - Convertidor DC/DC dual intercalado.	20
Figura 7. Modo de operación 1 del circuito para la topología propuesta.	21
Figura 8. Modo de operación 2 del circuito para la topología propuesta.	22
Figura 9. Modo de operación 3 del circuito para la topología propuesta.	22
Figura 10. Modo de operación 4 del circuito para la topología propuesta.	23
Figura 11. Esquema general del control.	25
Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.	28
Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo de chequeo.	30
Figura 14. Esquema de simulación para la topología propuesta.....	31
Figura 15. Esquema del control PI.....	33
Figura 16. Esquema de control P&O.	34
Figura 17. Esquema de control POC.....	35
Figura 18. Curva potencia-tensión del generador fotovoltaico caso 1,carga balanceada.	37

Figura 19. Curva potencia-tensión del generador fotovoltaico caso 2, carga balanceada.	38
Figura 20. Señales PWM de los IGBT, caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O.....	39
Figura 21. Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 1, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.....	40
Figura 22. Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 1, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.....	41
Figura 23. Tensiones de salida del convertidor, caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O.	42
Figura 24. Seguimiento del punto de máxima potencia caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O	43
Figura 25. Señales PWM de los IGBT, caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O.....	44
Figura 26. Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 2, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.....	45
Figura 27. Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 2, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.....	46
Figura 28. Tensiones de salida del convertidor, caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O.	47
Figura 29. Seguimiento del punto de máxima potencia caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O	48
Figura 30. Curva potencia-voltaje del generador fotovoltaico caso 1 carga desbalanceada.	49
Figura 31. Curva potencia-voltaje del generador fotovoltaico caso 2 carga desbalanceada.	50
Figura 32. Señales PWM de los IGBT, caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	51
Figura 33. Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 1, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.....	52

Figura 34. Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 1, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.	53
Figura 35. Seguimiento del punto de maxima potencia caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	54
Figura 36. Tensiones de salida del convertidor, caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	55
Figura 37. Señales PWM de los IGBT, caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	56
Figura 38. Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 2, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.	57
Figura 39. Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 2, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.	58
Figura 40. Seguimiento del punto de maxima potencia caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	59
Figura 41. Tensiones de salida del convertidor, caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.	60

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de simulacion.	32
Tabla 2. Características eléctricas del panel UPSOLAR UP-M250P	32
Tabla 3. Parámetros del control PI.....	33
Tabla 4. Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos.	36
Tabla 5. Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos para carga desbalanceada.	49

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Código del algoritmo P&O en el software MATLAB.....	65
Apéndice B. Código del algoritmo POC en el software MATLAB	68

Resumen

Título: Control del convertidor DC/DC dual intercalado para el seguimiento del punto de máxima potencia en generadores fotovoltaicos*

Autores: Laura Marcela Delgado Blanco; Daniela Andrea Duarte Mejía**

Palabras Clave: Convertidor DC/DC elevador dual intercalado, seguimiento del punto de máxima potencia, generador fotovoltaico.

Descripción

Las fuentes de energía renovables son de gran importancia como herramienta para reducir las emisiones contaminantes. En lo que respecta a la energía solar fotovoltaica, se puede afirmar que es una de las fuentes renovables más respetuosas con el medio ambiente, dadas sus bajas emisiones, ruidos y vibraciones. Los sistemas fotovoltaicos son viables debido a su portabilidad y su fácil conexión en lugares de difícil acceso sin embargo, enfrentan varios problemas como lo es la baja eficiencia que presenta. Con el fin de generar una solución a ello, el presente trabajo muestra el diseño y análisis de dos algoritmos empleados para el seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico, considerando la topología de convertidor DC/DC elevador dual intercalado conectado a la salida del generador que permite asegurar la armonía de las tensiones a la salida con ayuda de un inversor NPC de tres niveles. Las técnicas estudiadas corresponden a: el algoritmo de perturbar y observar (P&O), y el algoritmo perturbar, observar y comparar (POC), con los cuales tenemos mayor aprovechamiento de la energía proveniente de los paneles solares. Asimismo, se considera el uso de un controlador PI, con el fin de garantizar el balance de las tensiones en la salida del convertidor DC/DC. El funcionamiento de los algoritmos de control y del sistema fotovoltaico es analizado mediante simulaciones en el software Matlab/Simulink, bajo cargas tanto balanceadas como desbalanceadas, y para condiciones de irradiancia uniforme y sombras parciales en el generador fotovoltaico.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Directora María Alejandra Mantilla Villalobos PhD. en Ingeniería Codirectora Fausto Osorio Silva

Abstract

Title: Dual DC/DC converter control interleaved for maximum power point tracking in photovoltaic generators *

Authors: Laura Marcela Delgado Blanco; Daniela Andrea Duarte Mejía **

Keywords: Interleaved dual boost DC/DC converter, maximum power point tracking, photovoltaic generator

Description

Renewable energy sources are of great importance as a tool to reduce polluting emissions. Regarding photovoltaic solar energy, it can be stated that it is one of the most environmentally friendly renewable energy sources, given its low emissions, noise and vibrations. Photovoltaic systems are viable due to their portability and easy connection in places of difficult access, however, they face several problems such as low efficiency. In order to generate a solution to this, the present work shows the design and analysis of two algorithms used for tracking the maximum power point of a photovoltaic generator, considering the topology of a dual step-up DC/DC converter connected to the output of the generator that allows to ensure the harmony of the output voltages with the help of a three-level NPC inverter. The techniques studied correspond to: the perturb and observe (P&O) algorithm, and the perturb, observe and compare (POC) algorithm, with which we have a better use of the energy coming from the solar panels. Also, the use of a PI controller is considered, in order to guarantee the balance of the voltages at the output of the DC/DC converter. The performance of the control algorithms and the photovoltaic system is analyzed through simulations in Matlab/Simulink software, under both balanced and unbalanced loads, and for conditions of uniform irradiance and partial shadows on the photovoltaic generator.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director María Alejandra Mantilla Villalobos PhD. en Ingeniería Codirector Fausto Osorio Silva

Introducción

Durante los últimos tiempos, se han venido pronunciando problemas vinculados con factores energéticos y ecológicos debido al alto uso de combustibles fósiles; lo anterior ha llevado a proponer soluciones como lo son los sistemas eléctricos fotovoltaicos, buscando así, la protección al medio ambiente y el uso eficiente de los recursos naturales; en este caso la radiación incidente del sol (Molina, Mercado, & Wiernes, 2007).

En lo que respecta a la energía solar fotovoltaica, se puede afirmar que es una de las fuentes renovables más respetuosas con el medio ambiente, dadas sus bajas emisiones, ruidos y vibraciones. Esta tecnología, permite generar electricidad por medio de las células solares, las cuales en conjunto forman lo que se conoce como paneles solares y permiten transformar la energía proveniente de la radiación solar incidente en corriente eléctrica (Escola politecnica superior d'enginyeria de Manresa, 2009).

Si bien la fuente de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico es ilimitada y gratuita, el funcionamiento ineficiente podría encarecer su precio (Andújar, Enrique, Martínez, & Durán, s.f.). De esta manera, se crea la necesidad de analizar la forma como se puede ejercer un control para operar los paneles en el punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés), indistintamente de las condiciones del sistema eléctrico representadas mayormente por factores de carga y factores climáticos o ambientales (Molina, Mercado, & Wiernes, 2007). Entre los elementos empleados para lograr tal propósito, se resaltan los convertidores DC/DC, los cuales son conectados a la salida del generador fotovoltaico y se controlan con el fin de operar los paneles en el punto de máxima

potencia. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo de grado se considera una topología específica para este convertidor, el convertidor DC/DC elevador dual intercalado, el cual es controlado para el seguimiento del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico.

La topología de convertidor elevador DC/DC dual intercalado presenta en su salida dos puertos, haciéndola interesante para su uso con inversores de tres niveles en topología de fijación de diodos o NPC (*Diode Clamped Converter*), dado que mediante un control adecuado del convertidor DC/DC es posible ejercer un balance en las tensiones de los condensadores del lado de continua del inversor.

De esta manera, en este trabajo de grado se muestra el control de un convertidor elevador DC/DC dual intercalado por medio de técnicas específicas para el seguimiento de punto de máxima potencia: el algoritmo de perturbar y observar (P&O), y el algoritmo de perturbar, observar y comparar (POC). Asimismo, se emplea un controlador PI para garantizar el balance de las tensiones de salida del convertidor. El convertidor es diseñado para operar en modo continuo. El funcionamiento de los algoritmos de control y del sistema (generador fotovoltaico – convertidor DC/DC - carga) se analiza mediante diferentes simulaciones en el software Matlab/Simulink, ejecutadas ante cambios de irradiancia y temperatura, condiciones de sombras parciales, y cargas resistivas cargadas balanceadas y desbalanceadas.

Con el fin de contextualizar, a continuación, se presentan las bases teóricas del funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos.

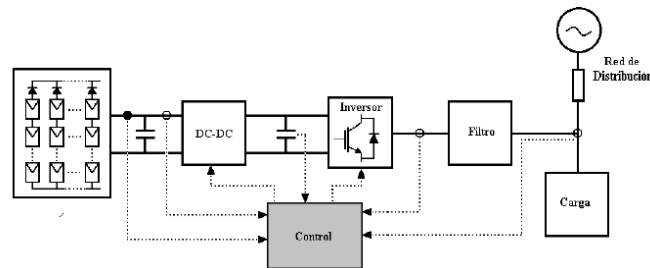
Sistemas fotovoltaicos de conexión a la red

Los generadores fotovoltaicos realizan la transformación directa de la radiación del sol en corriente continua, proceso que se da a través de celdas solares elementales mediante el proceso conocido como efecto fotovoltaico.

Un sistema fotovoltaico de conexión a la red, es un circuito conformado principalmente por: un conjunto de paneles fotovoltaicos, los cuales son los encargados de recibir la luz solar para suministrar la potencia necesaria; un convertidor DC/DC, el cual permite adecuar la tensión proporcionada por los paneles fotovoltaicos y realizar el seguimiento del punto de máxima potencia para que el sistema sea más eficiente, y un inversor para convertir las señales de DC a AC, de esta manera se puede suministrar energía a la red (Vargas & Rodríguez, 2017). Un diagrama de los componentes principales de un sistema fotovoltaico de conexión a la red se observa en la Figura 1.

Figura 1.

Sistema Fotovoltaico Típico



Nota. Tomado de: Vargas Parada, L. V., & Rodríguez Becerra, S. (2017). En *Convertidor DC/DC dual intercalado para aplicación en sistemas fotovoltaicos* (p. 20).

En el sistema fotovoltaico se pueden apreciar los siguientes elementos:

- **Generador fotovoltaico:** Los generadores fotovoltaicos compuestos por la conexión serie-paralelo de paneles fotovoltaicos, son dispositivos que captan la luz incidente y producen energía eléctrica (Garciglia, s.f.).

- **Convertidor DC/DC:** Dispositivo encargado de modificar o adecuar la tensión a la salida del generador fotovoltaico, proporcionando a su vez a la salida una señal de continua regulada.

- **Inversor:** Los convertidores DC/AC son circuitos diseñados para controlar el flujo de corriente eléctrica de una entrada de corriente continua y convertirla en corriente alterna. Con el crecimiento ágil de la tecnología de los convertidores de potencia, los inversores multinivel son una alternativa prometedora, los cuales poseen varios niveles de tensión de salida, y tienen amplia aplicabilidad en media y alta potencia, donde se requiere operar con tensiones elevadas.

Los inversores multinivel ofrecen diferentes ventajas respecto a los inversores tradicionales, como lo es la reducción de la distorsión armónica en las señales de salida y la reducción del esfuerzo en los semiconductores de potencia. Estos se clasifican principalmente en tres tipos: el inversor multinivel con fijación por diodos (NPC, *Diode Clamped Converter*), el inversor multinivel de condensadores flotantes, y el inversor multinivel de puente H en cascada (González Geraldo, 2006).

Para interés de este trabajo de grado, el inversor multinivel a tratar es el inversor NPC de tres niveles.

Inversor NPC: inversor por fijación de diodos (ver Figura 2), cuyos diodos son de recuperación ágil y capaces de conducir la corriente nominal del inversor, y así mismo se encuentran sujetos a una recuperación inversa rigurosa. El número de diodos de fijación aumenta de forma cuadrática según el número de niveles que este inversor posea (González Geraldo, 2006).

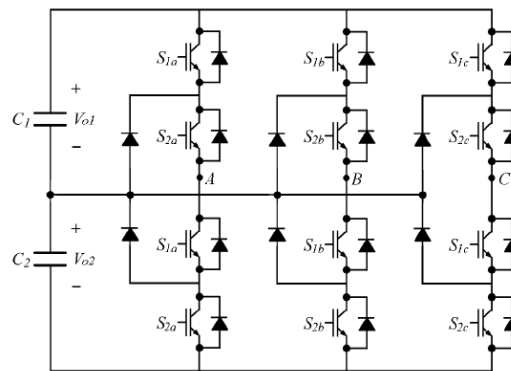
El inversor NPC de tres niveles presentado en la Figura 2, tiene las particularidades de una estructura de control simple, que lo hacen cautivador para la parte académica e industrial. Cada derivación del inversor NPC-3L, tiene cuatro dispositivos IGBT (*Insulated Gate Bipolar*

Transistor) conectados en serie. Este inversor emplea dos capacitores de placas en serie para el acoplamiento de continua y origina un nivel de tensión cero, de tal manera que la diferencia de potencial en cada IGBT, es la mitad de la tensión total del acoplamiento; esta peculiaridad permite que este inversor sea más conveniente en la industria ya que posee una mayor tensión de bus DC, un menor voltaje de modo común y un menor rizado de la corriente de salida para la misma frecuencia de conmutación, en comparación con el inversor convencional de dos niveles, lo que indica que este requiere un filtro de salida más pequeño.

El convertidor NPC de tres niveles presentado en la Figura 2 como su nombre lo indica, produce tres niveles de tensión a la salida: tensión positiva del bus DC, tensión cero y tensión negativa de bus DC (Baoze, 2017).

Figura 2.

Inversor multinivel con diodos anclados al neutro [Ilustración].



Nota. Tomado de: Vargas Parada, L. V., & Rodríguez Becerra, S. (2017). En *Convertidor DC/DC dual intercalado para aplicación en sistemas fotovoltaicos* (p. 27).

1. Convertidor DC/DC.

El principio fundamental de un convertidor DC/DC se basa en el almacenamiento momentáneo de energía y el posterior suministro de esta a la carga o sistema de salida, operación realizada periódicamente durante cada intervalo de tiempo conocido como periodo de conmutación.

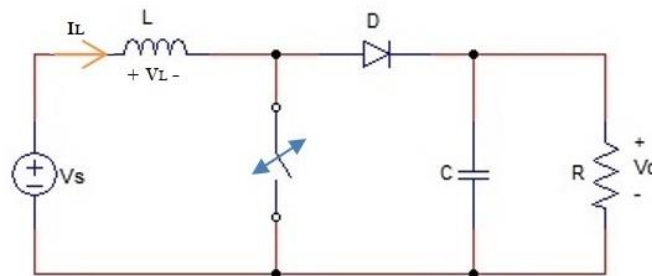
Existen varias topologías, pero las más destacadas para el objetivo del trabajo de grado son la topología elevadora clásica y la topología elevadora dual intercalada.

1.1 Topología elevadora

El convertidor DC/DC elevador permite obtener tensiones de salida de mayor o igual valor a la tensión de entrada. La Figura 3 presenta un esquema circuital de este convertidor. Este circuito funciona abriendo y cerrando periódicamente un interruptor electrónico controlado.

Figura 3.

Esquema del circuito del convertidor elevador



Para el análisis del circuito, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El circuito opera en régimen permanente y su periodo de conmutación es T , por ende, el interruptor está cerrado durante un intervalo de tiempo DT como se observa en la Figura 4 y está abierto durante un intervalo de tiempo $(1 - D) T$ como lo indica la Figura 5, donde D ($0 \leq D < 1$) se conoce como ciclo de trabajo.

- La corriente circulante por el inductor siempre es positiva, es decir, el convertidor opera en modo continuo.

- El capacitor es muy grande tal que la tensión de salida se conserva aproximadamente constante.

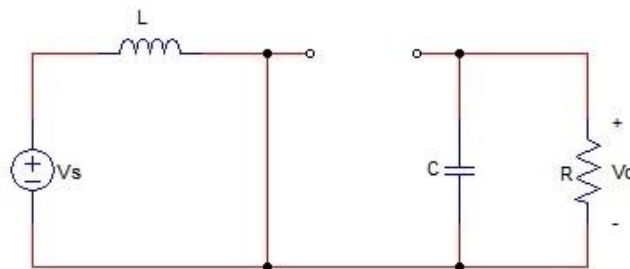
- Los componentes se consideran ideales.

Modos de operación

- Modo 1: Cuando el interruptor se encuentra cerrado

Figura 4.

Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado



En este modo de operación cuando el interruptor está cerrado presentado en la Figura 4, se polariza inversamente el diodo, y analizando el circuito por ley de tensiones de Kirchhoff, se obtiene que:

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_s DT}{L} \quad (2)$$

Como se puede observar, la variación de la corriente es constante, por ende, esta aumenta linealmente.

- Modo 2: Cuando el interruptor se encuentra abierto

Figura 5.

Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto



En este modo de operación el diodo se polariza directamente. Asumiendo que la tensión de salida es constante, se puede hallar la tensión en el inductor como:

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (4)$$

Cuando el interruptor se encuentra abierto como se observa en la Figura 5, la variación de la corriente en el inductor es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (5)$$

$$\Delta i_L = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} \tag{6}$$

Como inicialmente se asumió que el circuito trabaja en régimen permanente, la variación neta de la corriente del inductor debe ser igual a cero en un periodo:

$$(\Delta i_L)_{abierto} + (\Delta i_L)_{cerrado} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{V_s * DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} = 0 \tag{8}$$

Despejando de (8) la tensión de salida:

$$V_s * (D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \tag{9}$$

$$V_o = \frac{V_s}{(1 - D)} \tag{10}$$

Conociendo que la tensión media en el inductor también debe ser cero, se obtiene:

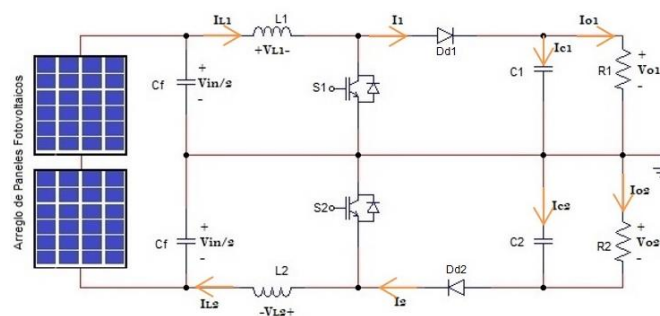
$$V_L = V_s * D + (V_s - V_o)(1 - D) = 0 \tag{11}$$

1.2 Convertidor DC/DC elevador dual intercalado

En la Figura 6 se presenta la topología de convertidor DC/DC elevador dual intercalado.

Figura 6.

Circuito para la topología propuesta - Convertidor DC/DC dual intercalado.



Para el análisis de este convertidor, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El circuito opera en régimen permanente y su periodo de conmutación es T .
- Cada uno de los interruptores (S_1 y S_2) está cerrado un tiempo $D_n T$ ($n=1$ para S_1 y $n=2$ para S_2) y está abierto en un tiempo $(1 - D_n) T$, donde D_n ($0 \leq D_n < 1$). Sin embargo, el pulso de disparo de S_2 está desfasado 180° con respecto al pulso de S_1 .
- La corriente circulante por los inductores siempre es positiva, es decir, el convertidor opera en modo continuo.
- Los condensadores de salida son muy grandes tal que la tensión de salida se conserva aproximadamente constante. Asimismo, se considera $C_1=C_2$.
- Los componentes se consideran ideales.

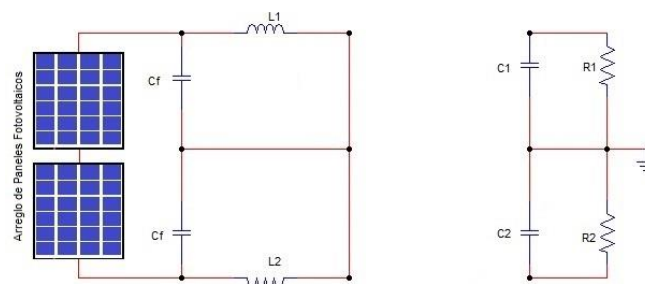
Modos de operación

Este convertidor presenta cuatro modos de operación.

- Modo 1: S_1 y S_2 cerrados.

Figura 7.

Modo de operación 1 del circuito para la topología propuesta.



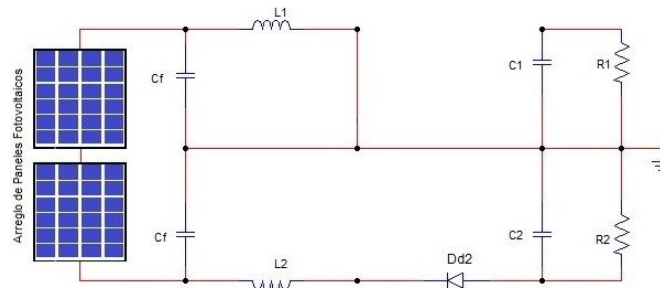
Cuando los dos interruptores se cierran como se observa en la Figura 7, la energía proveniente de la fuente de alimentación se transfiere a cada uno de los inductores. Los diodos D_1

y D_2 se polarizan inversamente, y parte de la energía almacenada en los capacitores se descarga a través de las cargas.

- Modo 2: S_1 cerrado y S_2 abierto.

Figura 8.

Modo de operación 2 del circuito para la topología propuesta.

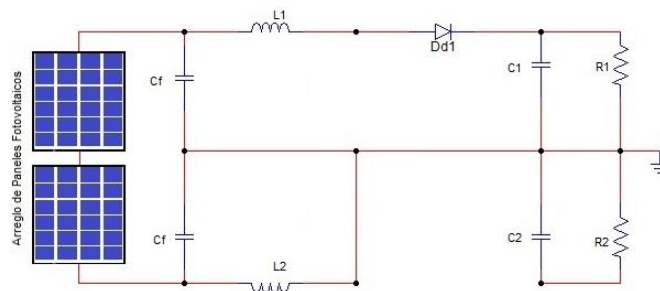


Cuando el interruptor S_1 se cierra y el interruptor S_2 se abre como se representa en la Figura 8, la corriente del inductor L_1 se eleva, mientras que la corriente del inductor L_2 circula por C_2 , la carga y D_2 , la cual disminuye hasta que S_2 vuelve a cerrarse.

- Modo 3: S_1 abierto y S_2 cerrado.

Figura 9.

Modo de operación 3 del circuito para la topología propuesta.

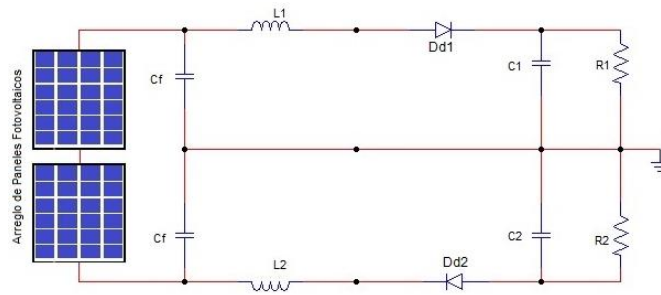


Cuando el interruptor S2 se cierra y el interruptor S1 se abre como se simboliza en la Figura 9, la corriente del inductor L2 se eleva, mientras que la corriente del inductor L1 circula por C1, la carga y D1, hasta que S1 se cierre.

- Modo 4: S₁ y S₂ abiertos.

Figura 10.

Modo de operación 4 del circuito para la topología propuesta.



Cuando los dos interruptores se abren como lo indica la Figura 10, las corrientes de los inductores L1 y L2 disminuyen, circulando a su vez por los capacitores, la carga y los diodos. La energía es proveniente de la fuente y lo almacenado en las bobinas para que así los capacitores alimenten la carga.

Análisis con el interruptor S1 cerrado

Aplicando la ley de tensiones de Kirchoff para la malla que incluye el capacitor Cf, la bobina L1 y el interruptor cerrado S₁:

$$V_{L1} = \frac{V_{in}}{2} = L \frac{di_{L1}}{dt} \rightarrow \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{in}}{2L} \tag{12}$$

$$\frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L1}}{D_1 T} = \frac{V_{in}}{2L} \rightarrow \Delta i_{L1} = \frac{V_{in} D_1 T}{2L} \tag{13}$$

Análisis con el interruptor S1 abierto

Suponiendo que la tensión de salida V_{o1} es constante, se calcula la tensión de la bobina así:

$$V_{L1} = \frac{V_{in}}{2} - V_{o1} = L \frac{di_{L1}}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{in} - 2V_{o1}}{2L} \quad (15)$$

La variación de la corriente de la bobina con el interruptor abierto es:

$$\frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L1}}{(1 - D_1)T} = \frac{V_{in} - 2V_{o1}}{2L} \quad (16)$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{(V_{in} - 2V_{o1})(1 - D_1)T}{2L} \quad (17)$$

Como en el régimen permanente la variación neta de la corriente de la bobina debe ser igual a cero en un periodo, se obtiene lo siguiente:

$$(\Delta i_{L1})_{abierto} + (\Delta i_{L1})_{cerrado} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{V_{in}D_1T}{2L} + \frac{(V_{in} - 2V_{o1})(1 - D_1)T}{2L} = 0 \quad (19)$$

Despejando V_{o1} :

$$V_{in}T - 2TV_{o1}(1 - D_1) = 0 \quad (20)$$

$$V_{o1} = \frac{V_{in}}{2(1 - D_1)} \quad (21)$$

De igual manera se realiza el análisis para el interruptor S2 y se obtiene que:

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_{in}D_2T}{2L} \quad (22)$$

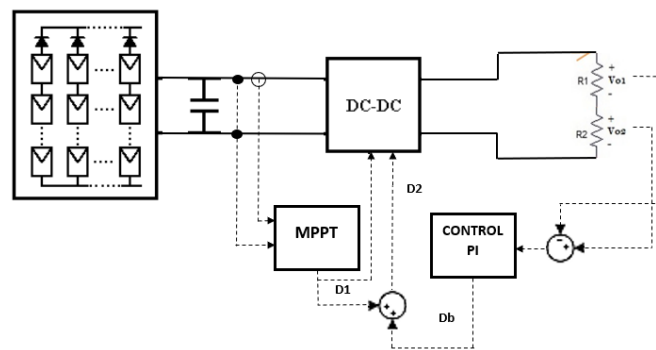
$$V_{o2} = \frac{V_{in}}{2(1 - D_2)} \quad (23)$$

2. Sistema de Control

El sistema de control del convertidor DC/DC opera sobre el ciclo de trabajo y busca realizar las siguientes acciones: seguir el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico y mantener balanceadas las tensiones de salida del convertidor. En la figura 11 se presenta el esquema general de control implementado.

Figura 11.

Esquema general del control.



2.1 Control PI

El control proporcional integral busca reducir el error en estado estable de un sistema de control, incluyendo un polo en el origen en el camino de transferencia directa y un cero cercano al polo de origen, que conlleva a aumentar el ancho de banda y por ende la velocidad de respuesta del controlador (Obando, 2019). Este tipo de compensador es conocido como controlador PI, definido por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = k_p \left(\frac{1}{T_i * s} + 1 \right)$$

En esta aplicación, el control PI es empleado para modificar el ciclo de trabajo del interruptor S_2 (ver figura 6), es decir D_2 , con el fin de mantener las tensiones de salida del convertidor balanceadas. La entrada del controlador PI corresponde a la diferencia entre las tensiones de salida, de tal manera que el ciclo de trabajo (D_b) determinado por el PI, se le adiciona al ciclo de trabajo resultante del MPPT, obteniendo de esta manera D_2 . Por su lado, el ciclo de trabajo del interruptor S_1 , se hace igual al ciclo de trabajo resultante del MPPT ($D_1=D$).

2.2 Algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas solares fotovoltaicos

Los algoritmos empleados para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) del generador fotovoltaico, varían el ciclo de trabajo del convertidor DC/DC buscando aumentar la potencia de salida, sin importar la posición del panel, las condiciones de la radiación solar, la temperatura a la que se encuentra, y la carga conectada. A continuación, se describen los dos algoritmos considerados en este trabajo.

2.3 Algoritmo perturbar y observar (P&O)

Este algoritmo opera perturbando (aumentando y decreciendo) la tensión en los terminales del generador fotovoltaico, acción que modifica el ciclo de trabajo del convertidor, para después comparar la potencia de salida del sistema fotovoltaico con la potencia del ciclo previo a la

perturbación, y tomar una decisión sobre la siguiente perturbación buscando aumentar la potencia entregada por el generador (González Romero & Cárdenas Carangui, 2016).

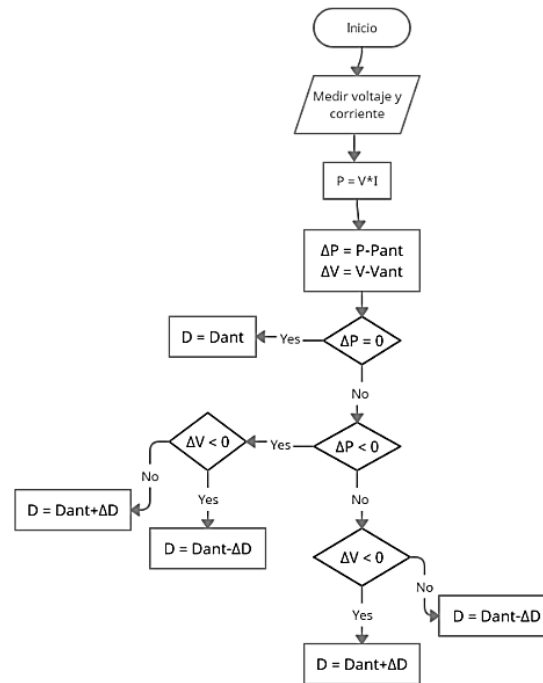
El algoritmo perturbar y observar consiste en:

- Cuando la tensión de operación del generador fotovoltaico se perturba en determinada dirección, y la potencia extraída del mismo aumenta, representa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, es decir, la tensión de operación deberá perturbarse en la misma dirección.
- Cuando la potencia extraída del módulo fotovoltaico decrece, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP; es decir, la tensión de operación deberá ser perturbada en la dirección opuesta a la que se asumió.
- Cuando se logra alcanzar el punto de máxima potencia, el algoritmo P&O obligará al punto de operación del generador fotovoltaico a que fluctúe cerca de él (Porto, 2018).

El diagrama de flujo del algoritmo P&O se muestra en la figura 12.

Figura 12.

Diagrama de flujo del algoritmo P&O.



2.4 Algoritmo perturbar, observar y comparar (POC)

Cuando el generador fotovoltaico se encuentra expuesto a condiciones de sombreado parcial, su curva característica de operación potencia vs tensión, puede presentar múltiples máximos locales y un solo máximo global de potencia. Los métodos para el seguimiento de punto de máxima potencia tradicionales no logran diferenciar el máximo global de los locales, por lo que pueden converger hacia un punto de máxima potencia local.

Con el fin de mejorar las dificultades considerables que se pueden presentar en los generadores fotovoltaicos cuando hay presencia de sombras parciales, se implementó una modificación de uno de los algoritmos tradicionales MPPT, el algoritmo perturbar, observar y comparar (POC). Este algoritmo es una modificación del algoritmo tradicional perturbar y

observar (P&O), que da solución al problema de los sistemas fotovoltaicos parcialmente sombreados.

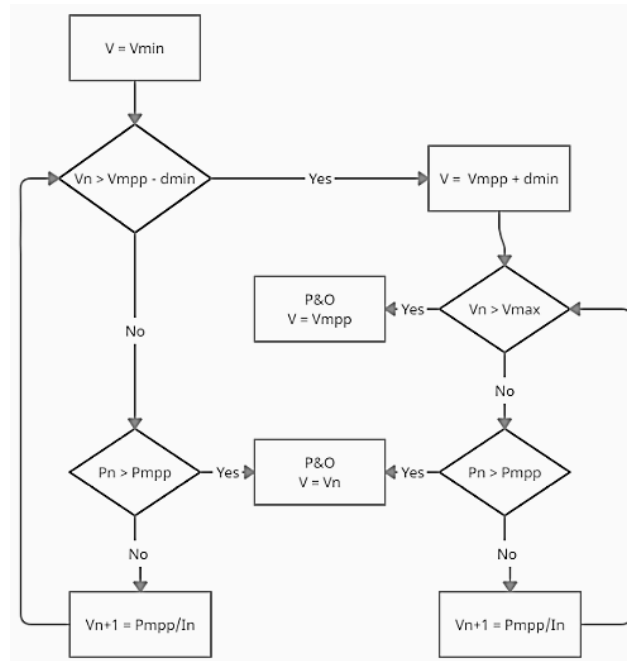
El algoritmo Perturbar, Observar & Comparar busca encontrar el MPP global, aplicando el algoritmo P&O tradicional en diferentes puntos de trabajo alrededor de los cuales podrían encontrarse puntos máximos locales, y comparando cada punto de convergencia con el MPP guardado previamente, hasta lograr el seguimiento del máximo global. Para ello, se determina inicialmente, una aproximación a la distancia mínima entre los posibles MPP locales, como $d_{min} = \frac{V_{mppoc}}{n}$, en la cual V_{mppoc} es la tensión del MPP local más próxima a la tensión de circuito abierto y n simboliza la cantidad de diodos de derivación en la cadena fotovoltaica.

Este método presentado en el diagrama de flujo de la Figura 13 consta de dos fases. La primera fase consiste en aplicar el método tradicional del algoritmo Perturbar & Observar (P&O) mencionado anteriormente, realizando una primera búsqueda a partir del menor valor de tensión más próximo a la corriente de cortocircuito. La segunda fase busca otros puntos máximos, comprobando así si el nuevo MPP hallado por el P&O es mayor o menor.

- Si el MPP guardado anteriormente por el P&O es mayor, este algoritmo POC reestablece el control del convertidor para igualar el MPP global.
- Si el MPP guardado anteriormente por el P&O es menor, el algoritmo POC le ordena al algoritmo P&O que debe iniciar una nueva exploración en búsqueda del MPP global, por lo que , encuentra un nuevo punto de operación por medio de $V_{n+1} = \frac{P_{mpp}}{I_n}$, en el cual, P_{mpp} es la potencia del MPP hallada por el algoritmo P&O, e I_n es la última corriente monitoreada, una vez encontrado este nuevo punto de operación, se mide y se compara con el MPP almacenado reiteradas veces hasta encontrar un MPP global.

Figura 13.

Diagrama de flujo del algoritmo de chequeo.

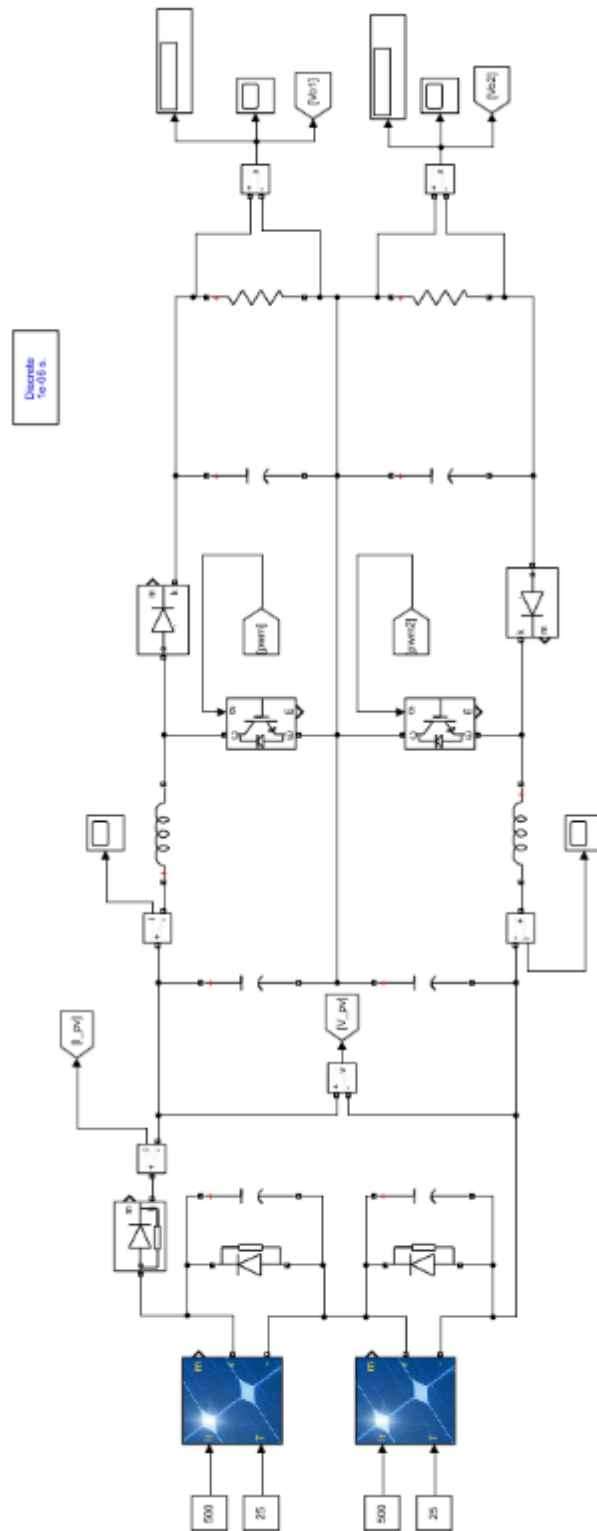


3. Desarrollo de la simulación

En esta sección se describen los componentes del esquema de simulación realizado en el software MATLAB/Simulink. En la figura 14 se muestra el circuito eléctrico general implementado en Simulink correspondiente al convertidor DC-DC elevador dual intercalado, el generador fotovoltaico, y la carga resistiva.

Figura 14.

Esquema de simulación para la topología propuesta.



Los parámetros de simulación se presentan en la Tabla 1. Los inductores se dimensionaron para asegurar el funcionamiento del convertidor en modo continuo y teniendo en cuenta un rizo pico a pico máximo en la corriente de los inductores del 20% y un rizo pico a pico máximo en la tensión de los capacitores del 5% a la salida del convertidor.

Tabla 1.

Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
$L_1 = L_2$	8.5 mH
$C_1 = C_2$	1000 μ F
$Cf_1 = Cf_2$	100 μ F
Frecuencia de conmutación	10 kHz

Generador fotovoltaico

Se consideraron dos paneles fotovoltaicos conectados en serie de referencia UPSOLAR UP-M250P. Las especificaciones eléctricas de cada panel se muestran en la tabla 2 para condiciones estándar de irradiancia y temperatura (1000 W/m² y 25°C, respectivamente).

Tabla 2.

Características eléctricas del panel UPSOLAR UP-M250P

UPSOLAR UP-M250P	
Potencia máxima	250 W
Tensión de circuito abierto	38 V
Tensión en el MPP	30.6 V
Corriente de corto circuito	8.5 A
Corriente en el MPP	8.17 A

Sistema de control

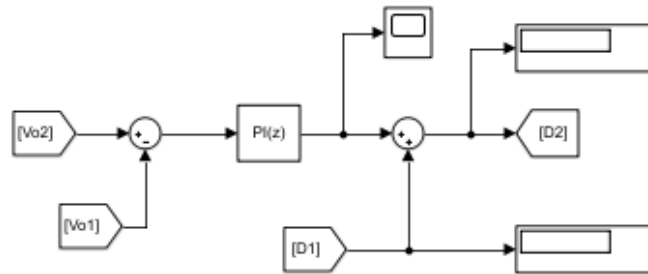
- Control PI:

El sistema de control PI implementado en MATLAB-Simulink se muestra en la figura 15.

Para el control se realiza una comparación entre las tensiones de salida del convertidor con el fin de que estas sean iguales para cualquier valor de carga.

Figura 15.

Esquema del control PI.



Los valores establecidos en el bloque de control se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros del control PI.

Parámetro	Valor
Periodo de muestreo	1 μ s
Constante proporcional	0.001
Constante integral	0.01

El error entre las tensiones medidas en la carga, es la entrada del bloque de control PI, el cual define si el ciclo de trabajo del interruptor S_2 (D_2) debe aumentar o disminuir con respecto al ciclo del interruptor S_1 (D_1), para garantizar el balance entre estas tensiones. De esta manera, la salida del PI se adiciona al ciclo de trabajo obtenido por el algoritmo P&O (ciclo de trabajo del interruptor S_1) obteniendo así, el ciclo de trabajo del interruptor S_2

MPPT

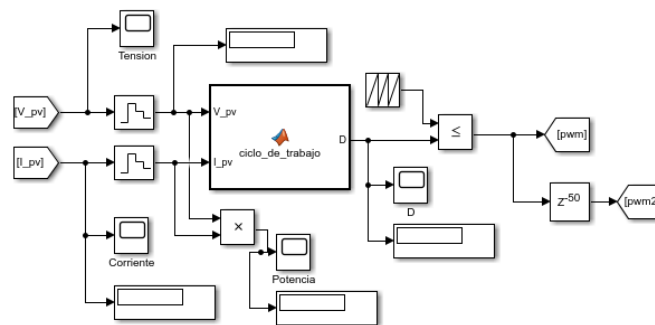
Para facilidad de manejo del software, se implementaron bloques de función para cada uno de los algoritmos MPPT, cuyas entradas son la tensión y corriente del generador fotovoltaico, para obtener como salida un ciclo de trabajo modificado por el algoritmo.

El sistema de control para el seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica perturbar y observar (P&O) implementado en MATLAB-Simulink se muestra en la figura 16.

El ciclo de trabajo de cada interruptor del convertidor DC/DC, se limita en un rango entre 0 y 0.9, y es inicializado en 0.7. Estos ciclos de trabajo son sintetizados mediante modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), empleando una señal diente de sierra a 10kHz y así obtener la señal de conmutación de los interruptores electrónicos.

Figura 16.

Esquema de control P&O.

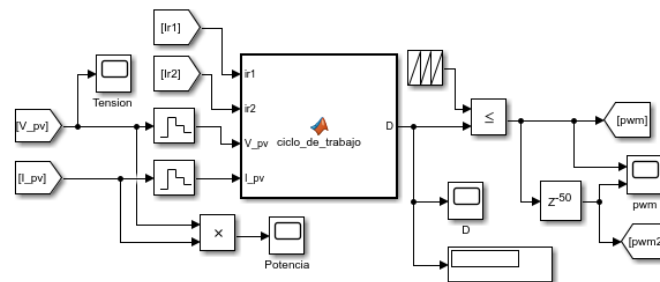


El código implementado dentro del bloque de función se encuentra en el anexo A. Durante el desarrollo del código se utilizan funciones como: persistent, la cual guarda los valores de las variables en la memoria a lo largo de la simulación; isempty, la cual determina si la matriz está vacía y condicionales, los cuales garantizan que encuentre el ciclo de trabajo para generar la máxima potencia del arreglo fotovoltaico.

El sistema de control para el seguimiento del punto de máxima potencia mediante la técnica perturbar, observar y comparar (POC) implementado en MATLAB-Simulink se muestra en la figura 17. Las tensiones de referencia tomadas en cuenta para el desarrollo del algoritmo son: 30.6 V y 61.2 V.

Figura 17.

Esquema de control POC.



El código implementado dentro del bloque de función se encuentra en el anexo B. Las funciones utilizadas son las mismas al del algoritmo anterior, pero se agregan más variables debido a que es necesario analizar el P&O para las tensiones de referencia enunciadas anteriormente. Durante el desarrollo del código, fue necesario implementar un contador que permite observar el comportamiento del algoritmo para cada tensión.

4. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación del convertidor DC/DC dual intercalado aplicado para el seguimiento de máxima potencia del generador fotovoltaico, bajo las técnicas de control descritas anteriormente. A continuación, se presentan los escenarios de simulación estudiados y los resultados obtenidos.

4.1 Escenario de simulación con carga balanceada

En este escenario, se considera una carga resistiva balanceada, de 200Ω por cada salida del convertidor. Asimismo, se estudia la respuesta de los algoritmos de control ante condiciones de sombras parciales en los paneles fotovoltaicos, para dos casos:

- Caso 1:

Las condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles se presentan en la Tabla 4. Además, la figura 18 muestra la curva de potencia-tensión del arreglo fotovoltaico.

Tabla 4.

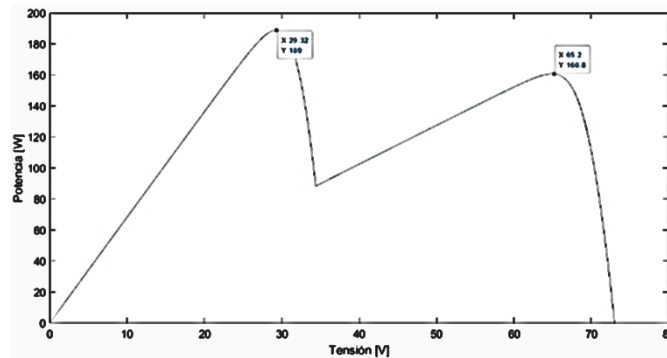
Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos.

		Panel 1	Panel 2
Caso 1	Irradiancia	300 W/m^2	800 W/m^2
	Temperatura	$25 \text{ }^\circ\text{C}$	$25 \text{ }^\circ\text{C}$
Caso 2	Irradiancia	550 W/m^2	650 W/m^2

	Panel 1	Panel 2
Temperatura	25 °C	25 °C

Figura 18.

Curva potencia-tensión del generador fotovoltaico caso 1, carga balanceada.



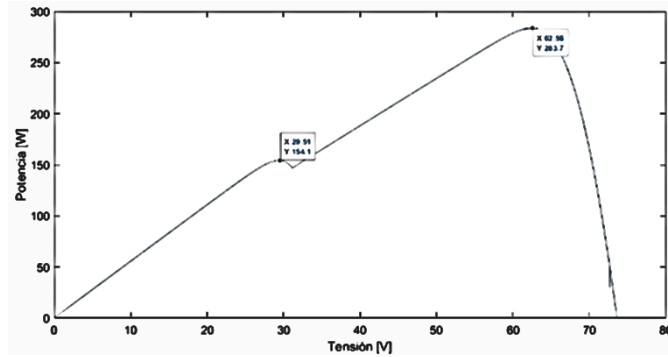
En este caso, la curva característica presenta dos puntos de máxima potencia local (189 W y 160.8 W), de los cuales uno es un máximo global.

- Caso 2:

Las condiciones de irradiancia y temperatura se presentan en la Tabla 4. Además, la figura 19 muestra la curva de potencia-tensión del arreglo fotovoltaico.

Figura 19.

Curva potencia-tensión del generador fotovoltaico caso 2, carga balanceada.



Para el caso dos, la curva característica presenta dos puntos de máxima potencia local (154.1 W y 283.8 W). El máximo global se encuentra cerca de la tensión de circuito abierto.

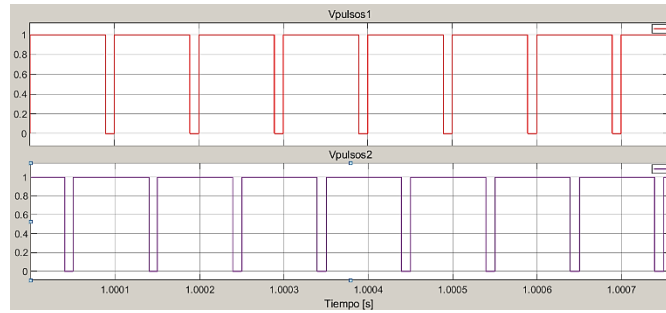
Resultados de la simulación

- Caso 1:

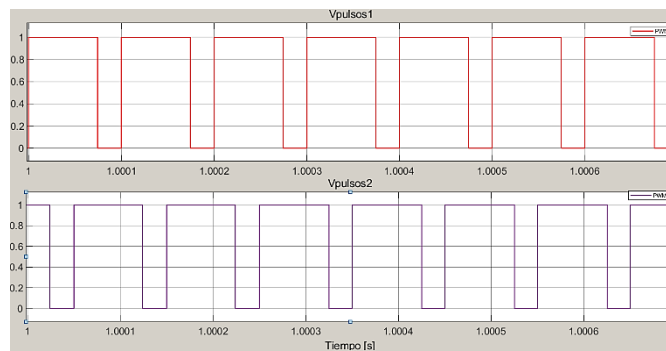
Los pulsos de las señales de conmutación PWM que llegan a los interruptores electrónicos se muestran en la figura 20, para régimen permanente. La figura 20a correspondiente a los pulsos obtenidos con el algoritmo POC, muestra un ciclo de trabajo de 0.89, mientras que la figura 20b, muestra un ciclo de trabajo de 0.74; esto debido a que el P&O no logra seguir el punto de máxima potencia global.

Figura 20.

Señales PWM de los IGBT, caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O



a)

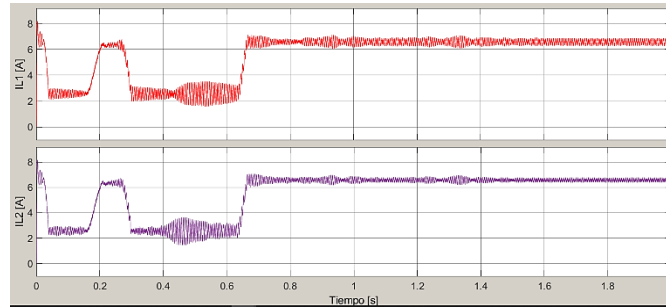


b)

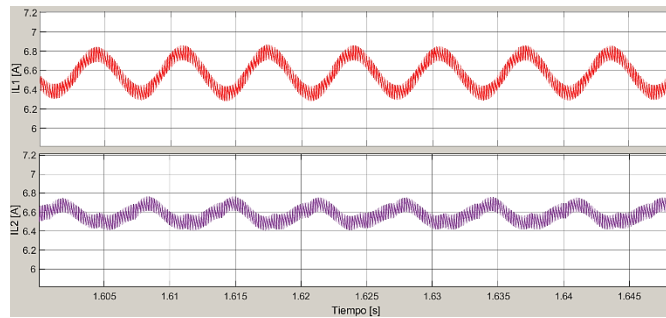
En las figuras 21 y 22 se observan las corrientes por las inductancias. Tal como se evidencia, en régimen permanente el convertidor opera en modo continuo.

Figura 21.

Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 1, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



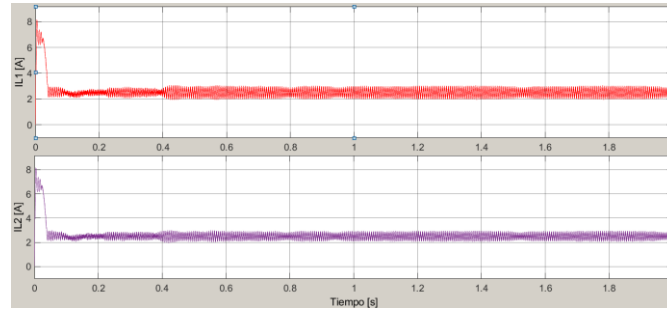
a)



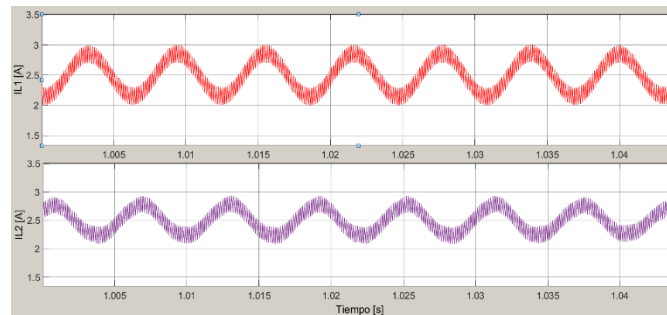
b)

Figura 22.

Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 1, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



a)

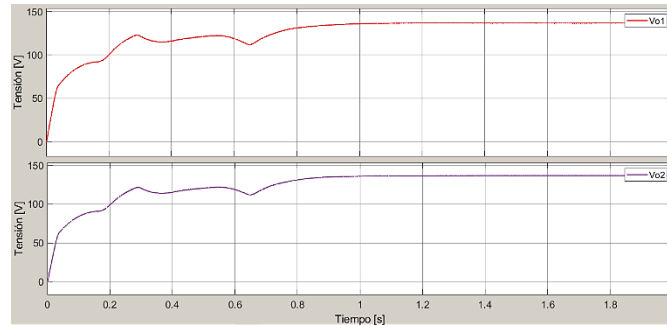


b)

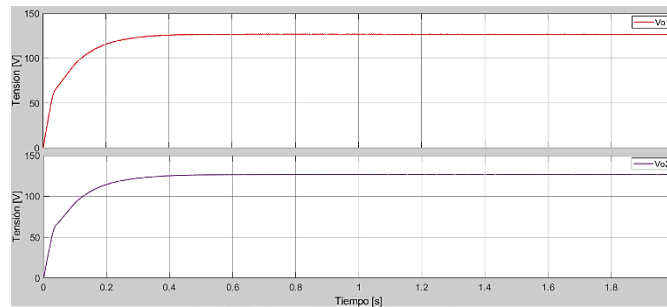
La figura 23 muestra las tensiones de salida del convertidor obtenidas con los algoritmos POC y P&O.

Figura 23.

Tensiones de salida del convertidor, caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O.



a)



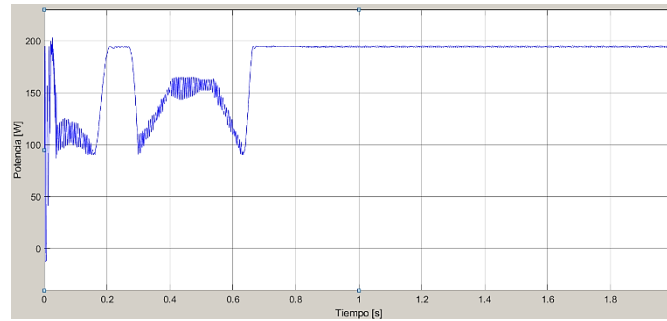
b)

Las tensiones de salida obtenidas con el algoritmo POC en régimen permanente, tienen un valor alrededor de 136.7 V, y tarda aproximadamente 0.8 segundos en estabilizarse, debido a las variaciones en la tensión de referencia propias del algoritmo. Por otro lado, las tensiones de salida para el algoritmo P&O tienen un valor alrededor de 126.9 V, estabilizándose a los 0.3 segundos.

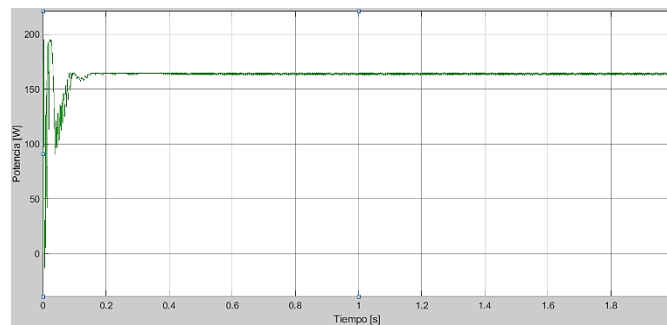
Las figuras 24a y 24b presentan la potencia generada por los paneles fotovoltaicos utilizando las técnicas POC y P&O, respectivamente.

Figura 24.

Seguimiento del punto de máxima potencia caso 1, carga balanceada. a) POC. b) P&O



a)



b)

En la figura 24a, el algoritmo POC determina inicialmente los valores de potencia para las diferentes tensiones de referencia aplicando la técnica P&O, luego compara los resultados anteriores para tomar como referencia la tensión en el cual la potencia es mayor. De esta manera, se garantiza que la potencia del arreglo fotovoltaico oscile en el máximo global.

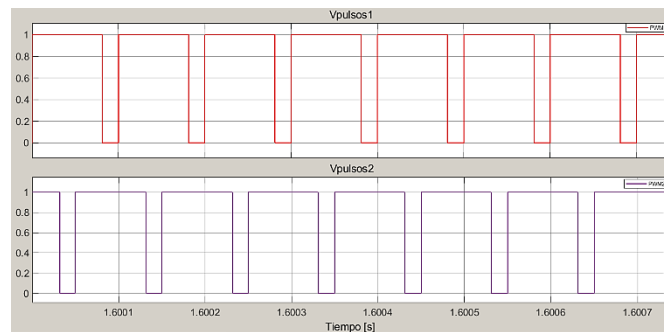
En la figura 24b, el algoritmo P&O oscila alrededor del máximo local equivalente a 160.8 W y tarda aproximadamente 0.2 segundos en alcanzar dicho punto.

- Caso 2:

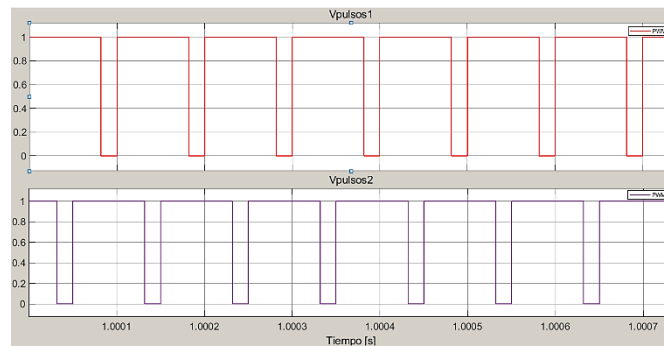
Las señales PWM se muestran en la figura 25. En este caso, el ancho de pulso obtenido para las dos técnicas es el mismo (alrededor de 81%), debido a que los dos algoritmos logran seguir el punto máximo de potencia global del arreglo fotovoltaico.

Figura 25.

Señales PWM de los IGBT, caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O.



a)

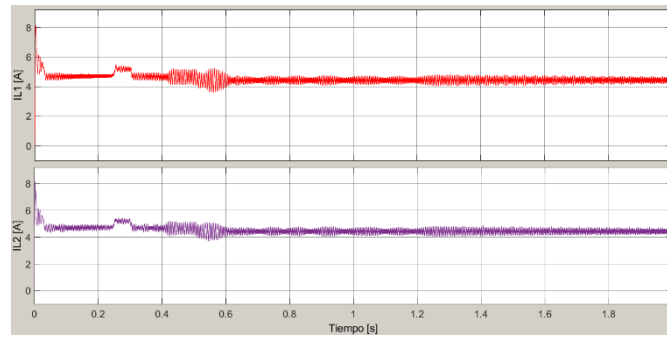


b)

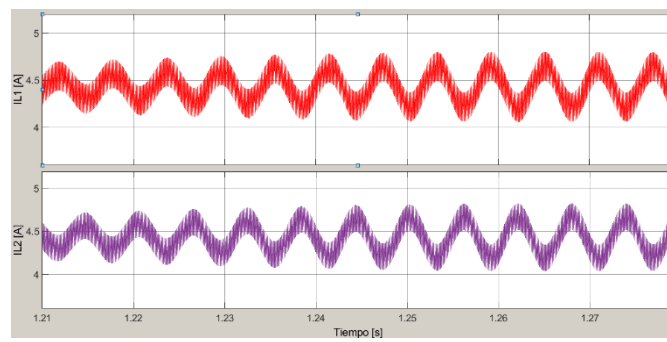
Las figuras 26 y 27 muestran el comportamiento de las corrientes que circulan por los inductores. Las corrientes se estabilizan resultando en forma oscilatoria y se observa que no caen en modo discontinuo.

Figura 26.

Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 2, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



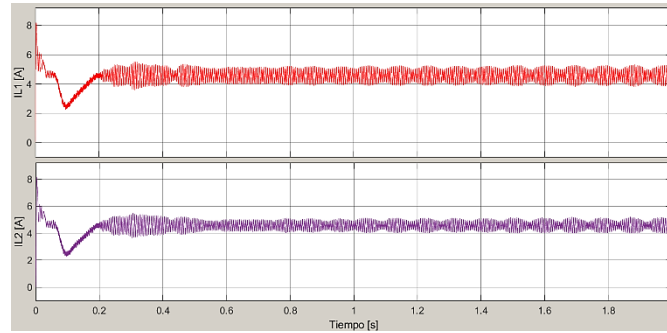
a)



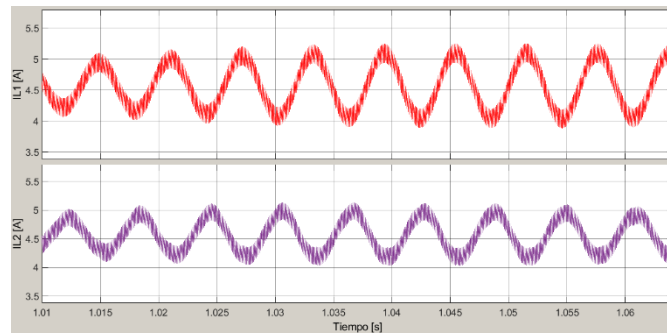
b)

Figura 27.

Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 2, carga balanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



a)

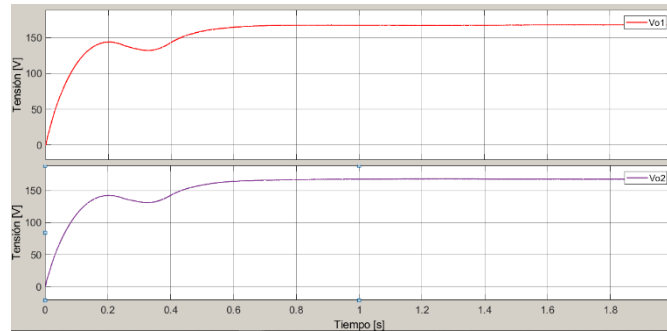


b)

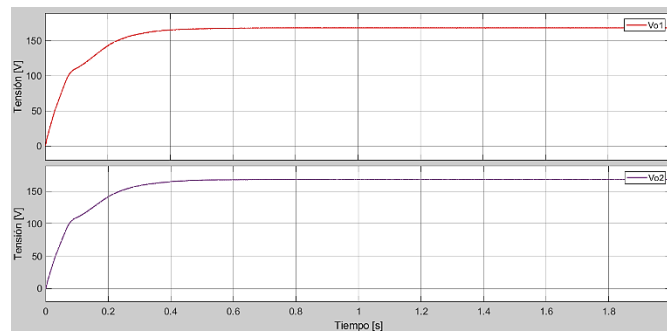
Como se observa en la figura 28, la tensión de salida para el algoritmo POC alcanza un valor alrededor de 168.2 V, estabilizándose alrededor de los 0.6 segundos. De igual manera, el algoritmo P&O alcanza ese valor de tensión, pero se estabiliza en un tiempo menor (0.4 s).

Figura 28.

Tensiones de salida del convertidor, caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O.



a)

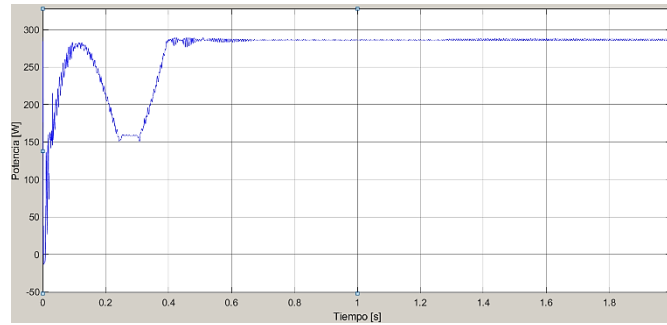


b)

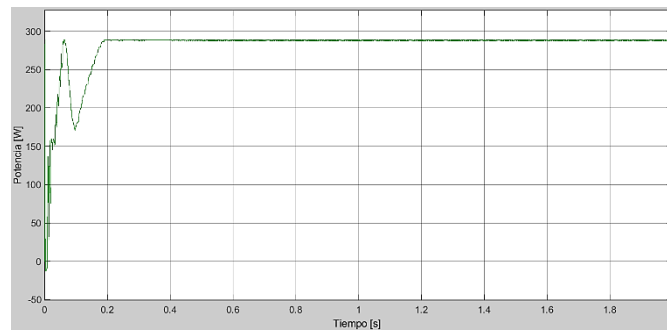
Las figuras 29a y 29b representan la potencia generada por los paneles fotovoltaicos utilizando las técnicas POC y P&O, respectivamente. En este caso, el algoritmo POC encuentra el máximo global en aproximadamente 0.5 s, cuando la tensión de referencia es cercana a la tensión de circuito abierto.

Figura 29.

Seguimiento del punto de máxima potencia caso 2, carga balanceada. a) POC. b) P&O



a)



b)

Como se muestra en la figura 29b, el algoritmo P&O logra seguir el punto de máxima potencia global oscilando alrededor de 283.8 W en un tiempo aproximado de 0.2 s.

4.2 Escenario de simulación con carga desbalanceada

En este caso se considera una carga desbalanceada de 100Ω (R_1) y 200Ω (R_2) para las salidas del convertidor DC/DC. Asimismo, se analizan dos casos de irradiancia descritos a continuación

- Caso 1:

Se consideran condiciones uniformes de irradiancia y temperatura en el generador fotovoltaico, tal como se presenta en la Tabla 5. Además, la figura 30 muestra la curva de potencia-tensión del arreglo fotovoltaico.

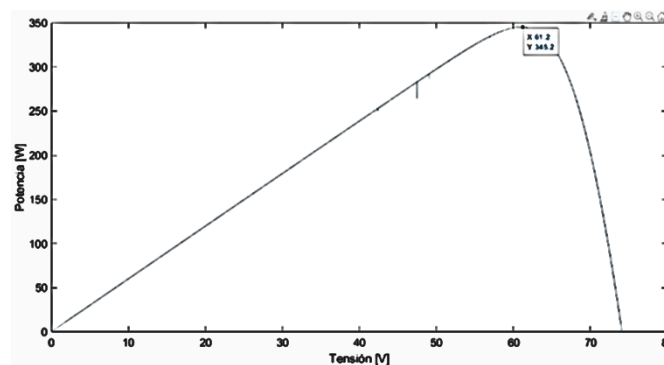
Tabla 5.

Condiciones de irradiancia y temperatura en los paneles fotovoltaicos para carga desbalanceada.

		Panel 1	Panel 2
Caso 1	Irradiancia	700 W/m ²	700 W/m ²
	Temperatura	25 °C	25 °C
Caso 2	Irradiancia	300 W/m ²	500 W/m ²
	Temperatura	25 °C	25 °C

Figura 30.

Curva potencia-voltaje del generador fotovoltaico caso 1 carga desbalanceada.



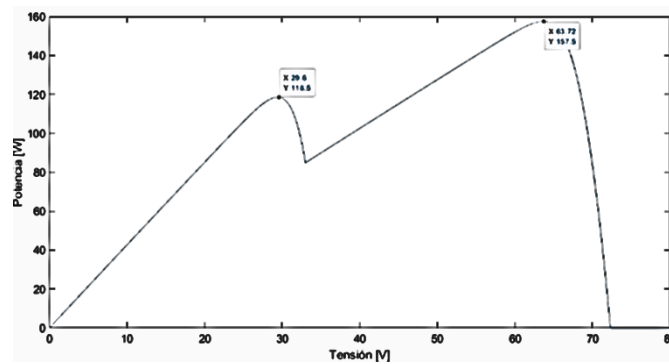
En este caso, como las irradiancias son iguales, la curva característica presenta un solo punto máximo de potencia equivalente a 345.2 W.

- Caso 2:

Las condiciones de irradiancia y temperatura se presentan en la Tabla 5. Además, la figura 31 muestra la curva de potencia-tensión del arreglo fotovoltaico.

Figura 31.

Curva potencia-voltaje del generador fotovoltaico caso 2 carga desbalanceada.



Para este caso, la curva característica presenta dos máximos locales y un máximo global de 157.5 W.

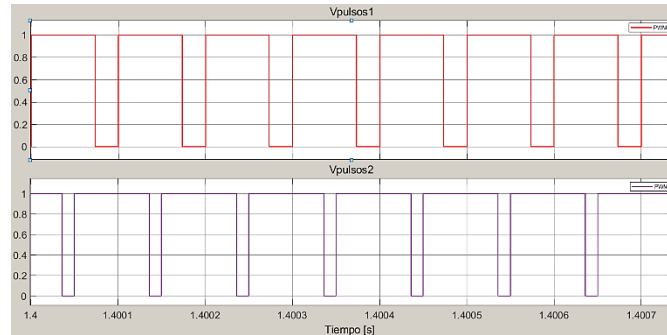
Resultados de la simulación

- Caso 1:

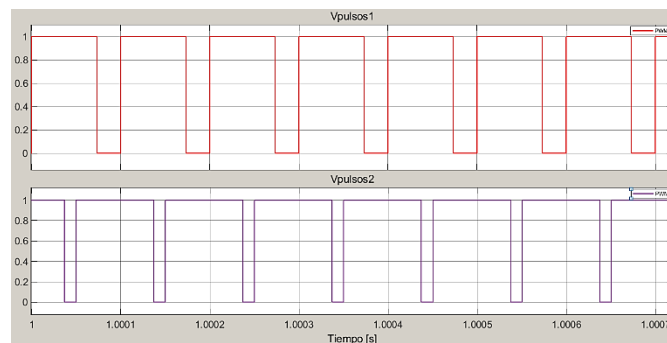
Los pulsos de las señales de conmutación PWM que llegan a los interruptores electrónicos se muestran en la figura 32. La figura 32a corresponde a los pulsos obtenidos con el algoritmo POC, donde se muestran una diferencia entre los ciclos de trabajo de los interruptores, es decir, el ancho de pulso del PWM1 es de 73%, y el del PWM2 es de 86%. De igual manera, en la figura 32b se presentan estos anchos de pulso para el algoritmo P&O.

Figura 32.

Señales PWM de los IGBT, caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)



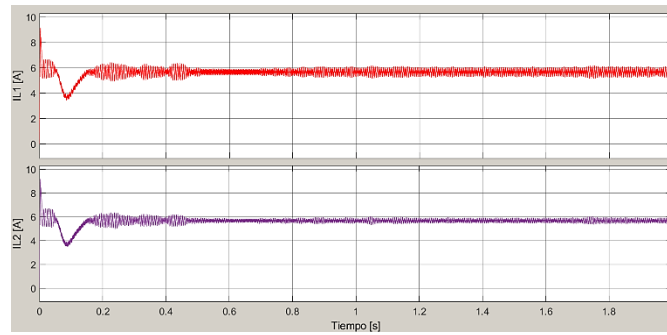
b)

La diferencia entre los ciclos de trabajo de los interruptores se debe al desbalance de carga, pues los ciclos se deben ajustar para balancear las tensiones de salida.

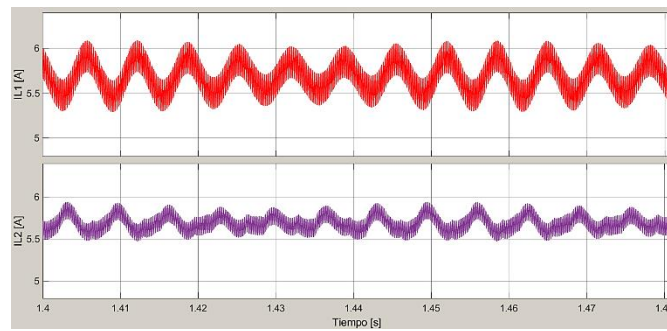
En las figuras 33 y 34 se observa que, para carga desbalanceada, las corrientes por las bobinas también se estabilizan en el tiempo en que las tensiones de salida del convertidor se encuentran balanceadas.

Figura 33.

Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 1, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



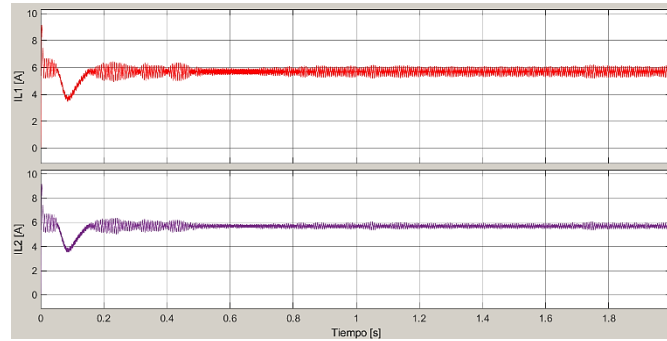
a)



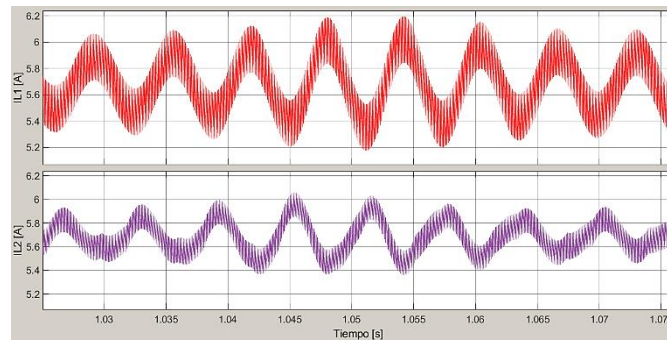
b)

Figura 34.

Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 1, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



a)

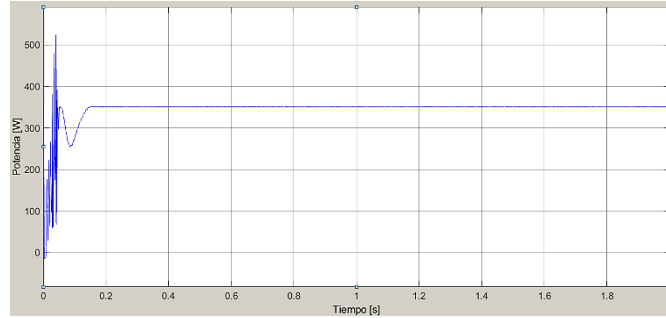


b)

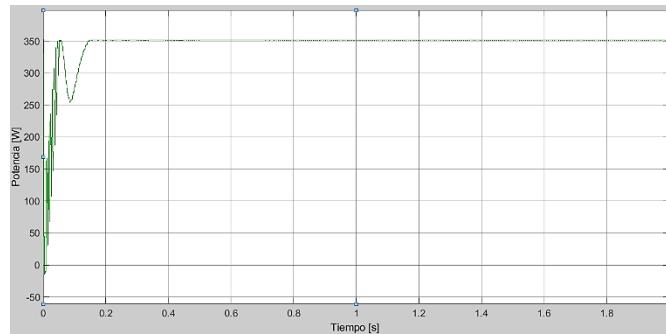
La figura 35 representa la potencia generada por los paneles fotovoltaicos utilizando las técnicas POC y P&O, cuando las irradiancias son iguales.

Figura 35.

Seguimiento del punto de máxima potencia caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)



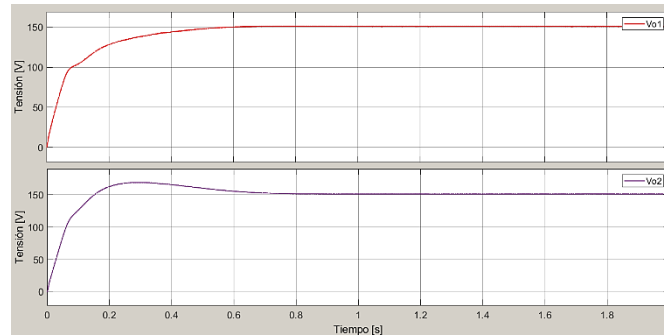
b)

Como se muestra en la figura 35, los algoritmos oscilan alrededor del punto máximo de potencia global. El tiempo que tardan en estabilizarse es de aproximadamente 0.15 s.

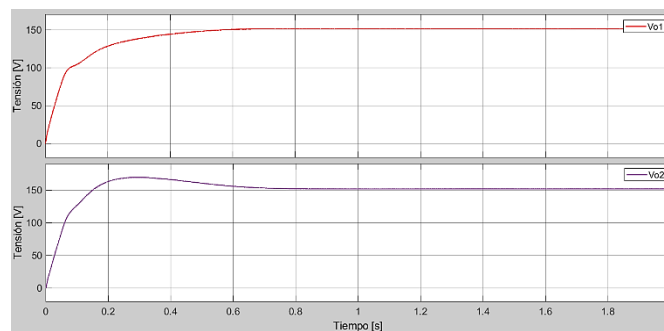
Las tensiones de salida del convertidor se encuentran en las figuras 36a y 36b.

Figura 36.

Tensiones de salida del convertidor, caso 1, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)



b)

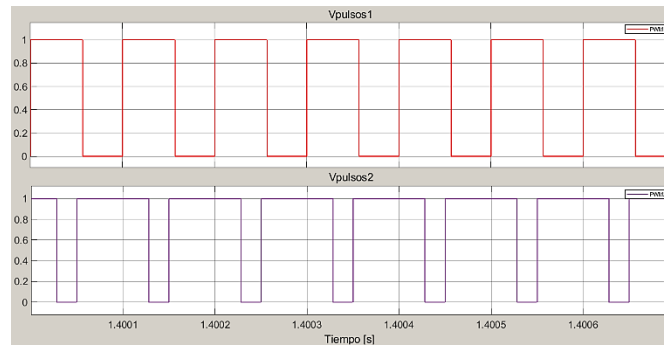
Las graficas inferiores de las figuras 36a y 36b muestran que tienen un tiempo de establecimiento de 0.8 s, punto a partir del cual las tensiones de salida del convertidor se vuelven iguales con un valor de 151.4 V. El tiempo de levantamiento corresponde a 0.17 s.

- Caso 2:

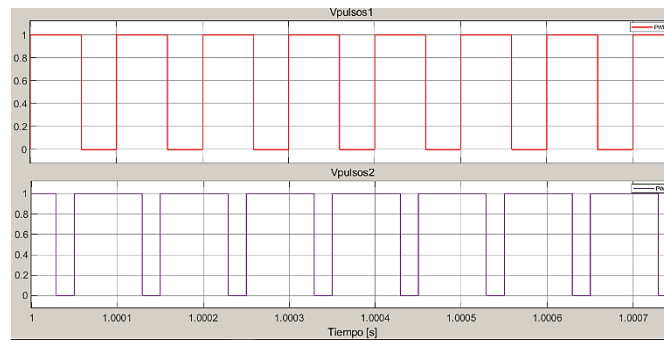
Las señales PWM se muestran en la figura 37. En este caso, los anchos de pulso para los PWM1 y PWM2 obtenidos para la técnica POC, fueron de 62% y 81%, respectivamente. En el caso de la técnica P&O, el resultado de los anchos de pulso fue de 58% y 78% para el PWM1 y el PWM2, respectivamente.

Figura 37.

Señales PWM de los IGBT, caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)

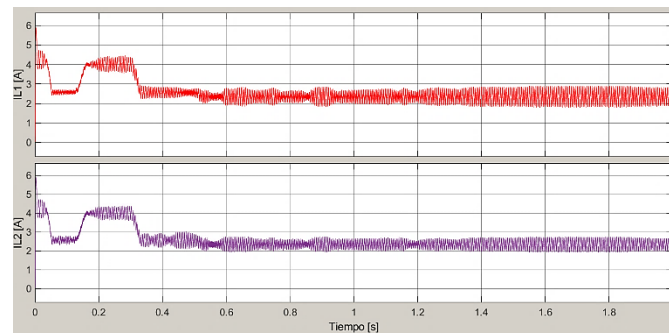


b)

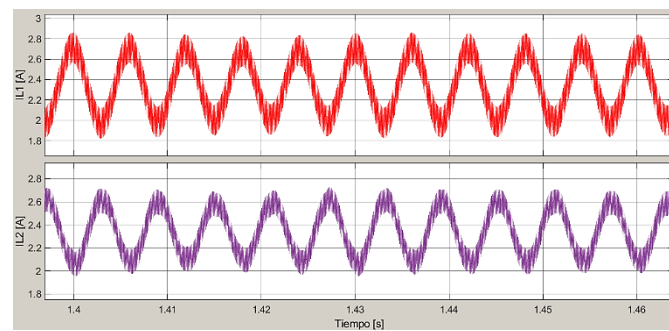
En las figuras 38 y 39 se observa que, para carga desbalanceada y condiciones no uniformes de irradiancia, las corrientes por las bobinas también se estabilizan produciendo oscilaciones en el tiempo en que las tensiones de salida del convertidor se encuentran balanceadas.

Figura 38.

Corriente en las bobinas con algoritmo POC, caso 2, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



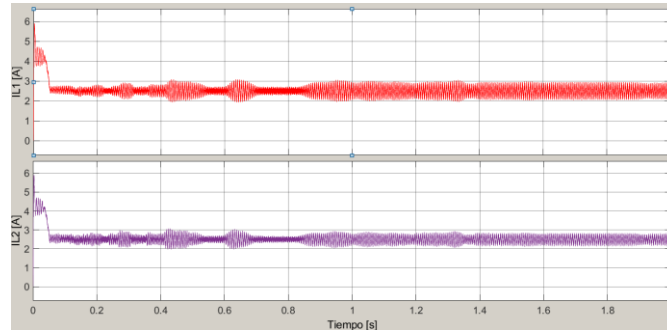
a)



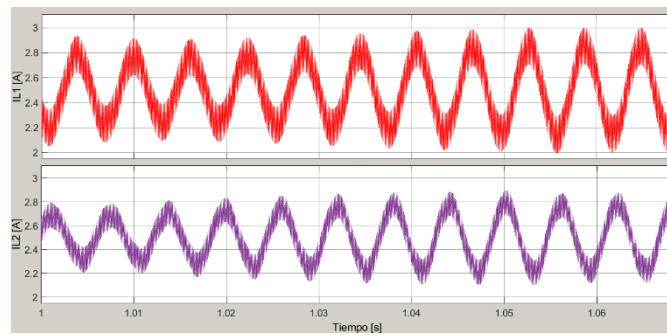
b)

Figura 39.

Corriente en las bobinas con algoritmo P&O, caso 2, carga desbalanceada. a) todo el tiempo. b) en estado estable.



a)

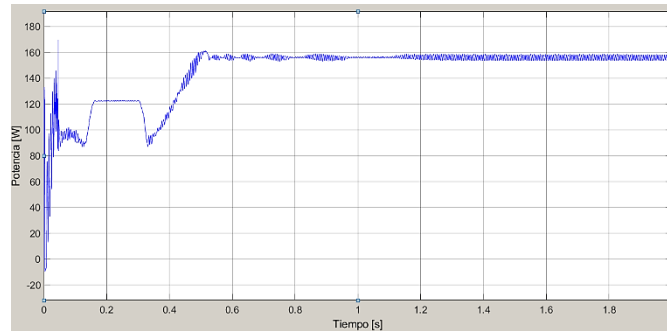


b)

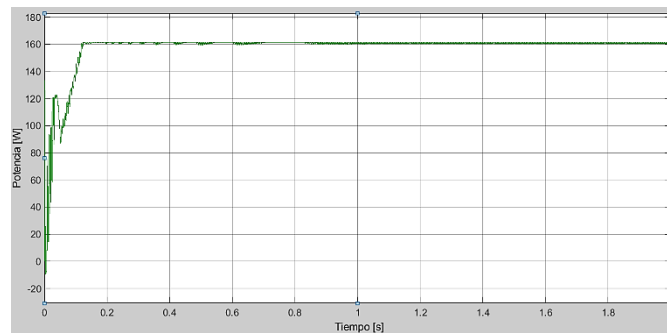
La figura 40 representa la potencia generada por los paneles fotovoltaicos utilizando las técnicas POC y P&O.

Figura 40.

Seguimiento del punto de máxima potencia caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)



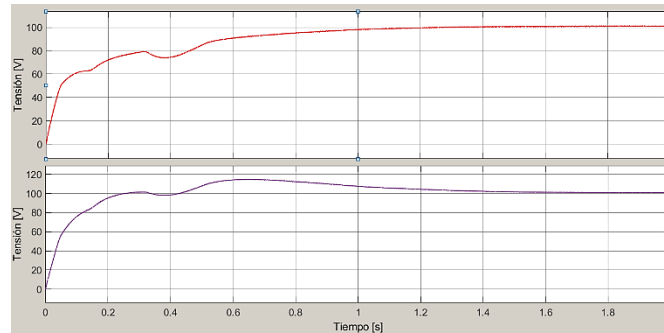
b)

Como se muestra en la figura 40a, la potencia alcanza el máximo global en aproximadamente 0.5s, oscilando alrededor de este. El algoritmo P&O obtiene un mejor comportamiento al encontrar el máximo global equivalente a 157.5W y oscila alrededor de este en un tiempo aproximado de 0.15 segundos.

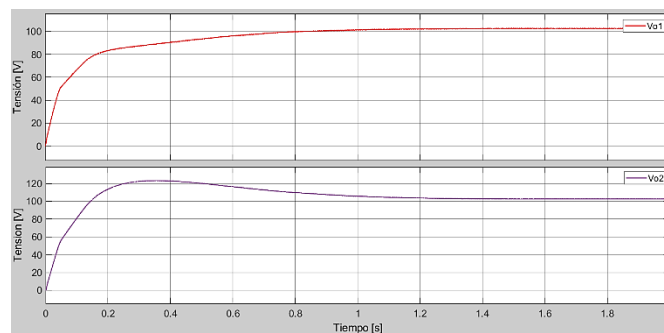
A continuación, se muestran las tensiones de salida obtenidas del convertidor:

Figura 41.

Tensiones de salida del convertidor, caso 2, carga desbalanceada. a) POC. b) P&O.



a)



b)

Para este caso, en la gráfica 41a se observa que se obtiene el balance de tensiones después de un segundo, tomando el valor de 97.1 V.

La gráfica inferior de la figura 41b muestra que el tiempo de establecimiento equivalente a 1.2 s, es mayor respecto al obtenido en el caso 1; sin embargo, el tiempo de levantamiento se mantiene igual, por otro lado, las tensiones de salida se igualan en un valor de 102.5 V.

5. Conclusiones

En este trabajo de grado se presentó el diseño y análisis mediante simulación, de dos algoritmos de control para la topología de convertidor DC/DC elevador dual intercalado, enfocados en el seguimiento del punto de máxima potencia para generadores fotovoltaicos. A partir de los resultados de simulación obtenidos, se concluye:

- El algoritmo de control perturbar, observar y comparar, presenta un mejor desempeño con respecto al algoritmo de perturbar y observar tradicional, ante condiciones de sombreado parcial en los paneles fotovoltaicos, debido a que con esta técnica se alcanza el punto de máxima potencia global.
- El control PI implementado permitió encontrar un ciclo de trabajo adecuado ante cargas desbalanceadas, manteniendo así las tensiones de salida equilibradas sin importar las condiciones de irradiancia presentes.
- La incidencia de sombras parciales en los paneles fotovoltaicos genera que las curvas características de potencia-tensión manifiesten puntos de máxima potencia locales. La técnica perturbar y observar clásica puede converger hacia esos máximos locales, por lo cual se analizó un algoritmo modificado en fundamento al algoritmo clásico P&O, que permite obtener un seguimiento del máximo global bajo las condiciones ya especificadas.

Referencias Bibliográficas

- Acciona. (s.f.). *La importancia de las energías renovables | acciona | business as unusual*. Obtenido de <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>
- Alonso, R., Ibanez, P., Martinez, V., Roman, E., & Sanz, A. (2009). *An innovative perturb, observe and check algorithm for partially shaded PV systems*. Barcelona: European Conference on Power Electronics and Applications.
- Andújar, J. M., Enrique, J. M., Martínez, M. A., & Durán, E. (s.f.). *Sistema de control de bajo costo para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/279710207_Sistema_de_control_de_bajo_costo_para_el_seguimiento_del_punto_de_maxima_potencia_en_sistemas_fotovoltaicos
- Baoze, W. (enero de 2017). *Inversor npc de tres niveles utilizado en sai. Universidad de Aalborg. Informe de SALICRU*. Obtenido de [https://www.salicru.com/files/pagina/72/360/jn018a00\(2\).pdf](https://www.salicru.com/files/pagina/72/360/jn018a00(2).pdf)
- Escola politecnica superior d'enginyeria de Manresa. (2009). *Instalación solar fotovoltaica conectada a red. (Trabajo de grado)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7170/MEMORIA%20TECNICA.pdf>
- Galera, V. (junio de 2002). *Simulador convertidores DC-DC. (Trabajo de grado)*. Universitat Rovira i Virgili, España. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42476504/potencia_apuntes.pdf?1455037873=&response-contentdisposition=inline%3B+filename%3Delectronica_de_potencia.pdf&Expires=1592260472&Signature=FwTKim1~l6ukVw7PU0sRJMofdhZm46b2KrvLnuphKw5Y5BO8jzoCdjacjTd~5ww8KgI

- Garciglia, R. S. (s.f.). *Paneles solares: generadores de energía eléctrica. Revista de divulgación Saber más UMSNH*. Obtenido de <https://sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/133-numero-1755/268-paneles-solares-generadores-de-energia-electrica.html#:~:text=PAÑELES%20SOLARES%3A%20GENERADORES%20DE%20ENERG%C3%8DA%20EL%C3%89CTRICA,-Escrito%20por%20Rafael&text=Se%20trata%20de%20la%20En>
- Gimeno S, J., Seguí C, S., & Orts G, S. (2011). *Convertidores electrónicos: energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño (1.a ed.)*. Valencia, España: Universitat Politècnica de Valencia. Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72021/TOC_6024_01_01.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- González Geraldo, M. O. (agosto de 2006). *Estudio de un inversor multinivel monofásico basado en inversores puente completo conectados en cascada para la realización de un compensador sincrónico estático (Statcom)*. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil eléctrico). Obtenido de <http://lep.eie.pucv.cl/TesisFlacoGonzalez.pdf>
- González Romero, J. A., & Cárdenas Carangui, X. A. (mayo de 2016). *Análisis e implementación de un sistema electrónico para alcanzar el punto máximo de potencia en los paneles solares de la Universidad Politécnica Salesiana*. (Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana). Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12243/1/UPS-CT006340.pdf>
- Molina, M. G., Mercado, P. E., & Wiernes, P. E. (2007). *Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica*. Asades (vol.11). Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/93306/Documento_completo.pdfPDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Obando, L. (2019). *Controlador PI – Proporcional Integral – Sistemas de Control*. dademuchconnection. Obtenido de <https://dademuch.com/2019/06/14/controlador-pi-proporcional-integral-sistemas-de-control/>
- Palacios Duarte, J. E. (2015). *Diseño e implementación de un convertidor DC-DC de tipo bidireccional*. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico y de telecomunicaciones). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/7918/1/T05916.pdf>

- Porto, V. J. (enero de 2018). *Diseño e implementación de un controlador neuronal artificial dinámico para optimizar el algoritmo de perturbación y observación en el seguimiento del punto de máxima potencia de un módulo fotovoltaico. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero.* Obtenido de <https://core.ac.uk/reader/270124430>
- Ramos Flores, C. (julio de 2017). *Análisis de un convertidor dc/dc destinado al almacenamiento híbrido de energía. (Trabajo de grado para optar el título de ingeniera en tecnologías industriales).* Universidad Politécnica, Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/48060/1/TFG_CRISTINA_RAMOS_FLORES.pdf
- Rashid, M. (2015). *Electronica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones (2.a ed.). (traduccion de: Sanchez Garcia, G).* Mexico: Pearson Educación.
- Vargas, L. V., & Rodríguez, S. (2017). *Convertidor DC/DC elevador dual intercalado para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos. (Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista).* Obtenido de <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/9536/1/166150.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Código del algoritmo P&O en el software MATLAB

```
function D = ciclo_de_trabajo(V_pv, I_pv)
```

```
D_min = 0;
```

```
D_max = 0.9;
```

```
persistent V_pre P_pre D_pre
```

```
if isempty(D_pre)
```

```
V_pre = 0;
```

```
P_pre = 0;
```

```
D_pre = 0.7;
```

```
end
```

```
P_pv = V_pv*I_pv;
```

```
delta_D = 0.0001;
```

```
if P_pv == P_pre
```

```
    D = D_pre;
```

```
else
```

```
  if (P_pv > P_pre)
```

```
    if (V_pv > V_pre)
```

```
      D = D_pre - delta_D;
```

```
    else
```

```
      D = D_pre + delta_D;
```

```
    end
```

```
  else
```

```
    if (V_pv > V_pre)
```

```
      D = D_pre + delta_D;
```

```
    else
```

```
      D = D_pre - delta_D;
```

```
    end
```

```
  end
```

```
end
```

```
if D >= D_max
```

```
  D = D_max;
```

```
elseif D < D_min
```

```
  D = D_min;
```

```
end
```

```
V_pre = V_pv;
```

$$P_{pre} = P_{pv};$$

$$D_{pre} = D;$$

Apéndice B. Código del algoritmo POC en el software MATLAB

```
function D = ciclo_de_trabajo(ir1, ir2, V_pv, I_pv)
```

```
D_min = 0;
```

```
D_max = 0.9;
```

```
persistent V_pre P_pre D_pre c
```

```
persistent V_pre2 P_pre2
```

```
persistent V_pre3 P_pre3
```

```
persistent pmax
```

```
if isempty (pmax)
```

```
pmax=0;
```

```
end
```

```
if isempty(D_pre)
```

```
D_pre = 0.7;
```

```
P_pre = pmax
```

```
P_pre2 = pmax
```

```
end
```

```
%% contador
```

```
dt= 1e-6;

if isempty(c)

    c = 0;

end

c = c+dt;

con=c

%% irradiancias iguales

persistent D_pre1 V_pre1 P_pre1

if ir1==ir2

    if isempty(D_pre1)

        V_pre1 = 30.6;

        P_pre1 = 0;

        D_pre1 = 0.7;

    end

    P_pv = V_pv*I_pv;

    delta_D = 0.0001;

    if P_pv == P_pre1

        D = D_pre1;

    else
```

```
if (P_pv > P_pre1)
    if (V_pv > V_pre1)
        D = D_pre1 - delta_D;
    else
        D = D_pre1 + delta_D;
    end
else
    if (V_pv > V_pre1)
        D = D_pre1 + delta_D;
    else
        D = D_pre1 - delta_D;
    end
end

end

if D >= D_max
    D = D_max;
elseif D < D_min
    D = D_min;
end

V_pre1 = V_pv;
P_pre1 = P_pv;
```

```
D_pre1 = D;
```

```
%% irradiancias diferentes
```

```
Else
```

```
%% primer valor de referencia
```

```
if c < 0.0028
```

```
    V_pre = 30.6;
```

```
    P_pre = pmax;
```

```
P_pv = V_pv*I_pv;
```

```
delta_D = 0.0001;
```

```
if P_pv == P_pre
```

```
    D = D_pre;
```

```
else
```

```
    if (P_pv > P_pre)
```

```
        if (V_pv > V_pre)
```

```
            D = D_pre - delta_D;
```

```
        else
```

```
            D = D_pre + delta_D;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
if (V_pv > V_pre)
    D = D_pre + delta_D;
else
    D = D_pre - delta_D;
end
end
end
```

```
if D >= D_max
    D = D_max;
elseif D < D_min
    D = D_min;
end
```

```
V_pre = V_pv;
P_pre = P_pv;
D_pre = D;
```

```
%% segundo valor de referencia
```

```
elseif c > 0.0028 && c < 0.0048
    V_pre2 = 30.6*2;
    P_pre2 = pmax;
P_pv = V_pv*I_pv;
```

```
delta_D = 0.0001;
```

```
if P_pv == P_pre2
```

```
    D = D_pre;
```

```
else
```

```
    if (P_pv > P_pre2)
```

```
        if (V_pv > V_pre2)
```

```
            D = D_pre - delta_D;
```

```
        else
```

```
            D = D_pre + delta_D;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if (V_pv > V_pre2)
```

```
            D = D_pre + delta_D;
```

```
        else
```

```
            D = D_pre - delta_D;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
if D >= D_max
```

```
    D = D_max;
```

```
elseif D < D_min
```

```
D = D_min;
```

```
end
```

```
V_pre2 = V_pv;
```

```
P_pre2 = P_pv;
```

```
D_pre = D;
```

```
%% comparación de las potencias obtenidas para cada valor de referencia
```

```
else
```

```
    if P_pre > P_pre2
```

```
        P_pre3 = P_pre;
```

```
        V_pre3 = 30.6;
```

```
    else
```

```
        P_pre3 = P_pre2;
```

```
        V_pre3 = 30.6*2;
```

```
    end
```

```
P_pv = V_pv * I_pv;
```

```
delta_D = 0.0001;
```

```
if P_pv == P_pre3
```

```
    D = D_pre;
```

```
else
```

```
if (P_pv > P_pre3)
    if (V_pv > V_pre3)
        D = D_pre - delta_D;
    else
        D = D_pre + delta_D;
    end
else
    if (V_pv > V_pre3)
        D = D_pre + delta_D;
    else
        D = D_pre - delta_D;
    end
end

end

if D >= D_max
    D = D_max;
elseif D < D_min
    D = D_min;
end

V_pre3 = V_pv;
P_pre3 = P_pv;
```

```
D_pre = D;
```

```
end
```

```
end
```

```
%% potencia máxima
```

```
if P_pv > pmax
```

```
    pmax = P_pv;
```

```
end
```