

**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CD/CD PARA EL
SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE GENERADORES
FOTOVOLTAICOS**

YULIANY GARCÍA CARRASCAL

JESÚS MANTILLA GAMARRA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTNADER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES BUCARAMANGA

2014

IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CD/CD PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE GENERADORES FOTOVOLTAICOS

YULIANY GARCÍA CARRASCAL

JESÚS MANTILLA GAMARRA

Trabajo presentado como requisito para optar por al título de ingeniero electrónico

Director:

PhD. (c) MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Co Director

PhD. JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES BUCARAMANGA
2014

Agradezco a todas las personas por las cuales ha sido posible el desarrollo de este proyecto, de forma directa o indirecta. A la profesora María Alejandra por el acompañamiento y porque gracias a su dedicación encontré en las energías alternativas una pasión.

A los profesores Johann Petit y el profesor Hermann Vargas por su apoyo y motivación a lo largo de este proceso.

A mi compañero Jesús, por su paciencia, actitud positiva y por trabajar a la par, haciendo la carga un poco más liviana.

Por último pero no menos importante agradezco a mi familia, mi papá y especialmente a mi mamá por estar siempre presente en todos los momentos de mi vida haciendo mis logros más valiosos.

Gracias a todos porque a ellos debo lo que soy y lo que seré.

Yuliany García Carrascal.

En la finalización de esta importante etapa de mi vida cabe agradecer enormemente a todas las personas que de una manera u otra aportaron de sí para hacer esto posible.

Siendo más específico, quiero agradecer inicialmente a Dios por brindarme de su fortaleza y amor y permitirme mantenerme firme aun en momentos en los que creí que no continuaría.

Doy gracias a mis padres por apoyarme incondicionalmente en el día a día de este proceso, a mi tía por acogerme en su hogar y convertirme en prácticamente su hijo en una ciudad diferente a la mía y a mi familia por estar ahí siempre para mí.

No puedo pasar por alto la dedicación y apoyo de la profesora María Alejandra Mantilla al acompañarnos en la realización de este proyecto ni a la maravillosa persona que encontré en mi compañera Yuliany García con la que aprendí y disfruté cada uno de los momentos vividos en el desarrollo de este proyecto de grado.

A los profesores, compañeros, amigos y demás personas que hicieron de esta experiencia una muy rica vivencia y me permitieron disfrutar cada uno de los días de esta carrera, solo puedo expresar mi gratitud a cada uno de ellos por ser parte de esto.

Jesús Mantilla Gamarra

Tabla de Contenido

Introducción	14
1 Generadores fotovoltaicos.....	15
2 Convertidores cd/cd.....	16
3 MPPT.....	16
3.1. Hill Climbing/P&O	17
4 Descripción y funcionamiento de las etapas del sistema	18
4.1. Convertidor CD/CD	18
4.1.1. Selección de componentes.....	18
4.2. Sensores	20
4.3. Controlador	20
4.4. Acople	21
4.5. Driver	22
5 Pruebas y resultados.....	23
6 Conclusiones.....	25
7 Observaciones	25
Referencias.....	25
Bibliografía	27
Anexos	28

Lista de Figuras

Figura 1. Relación de corriente contra tensión del Generador Fotovoltaico	14
Figura 2. Diagrama de sistema de panel, convertidor e inversor para conectar a la red.	15
Figura 3. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico	15
Figura 4. Gráficas de corriente-tensión y potencia-tensión de un panel fotovoltaico.....	16
Figura 5. Convertidor CD/CD elevador o boost	16
Figura 6. Principio de funcionamiento de método P&O	17
Figura 7. Diagrama del algoritmo P&O.....	18
Figura 8. Diagrama de etapas del sistema.....	18
Figura 9. Simulación de la corriente en la bobina para distintos valores de inductancia. a) 1.25mH b) 15mH c) 30mH d) 50mH	20
Figura 10. Tarjeta de desarrollo MSP-EXP430G2 LaunchPad.....	21
Figura 11. Diagrama esquemático de etapa de acople	21
Figura 12. Retardos en el pulso debido a la etapa de acople. a) Retardo de subida b) Retardo de bajada.....	22
Figura 13. Retardo total debido al acople y al driver. a) Retardo de subida b) Retardo de bajada	22
Figura 14. Montaje final del sistema	23
Figura 15. Entrada y salida de tensión del convertidor a $1037\text{W}/\text{m}^2$ (Rojo: entrada, azul: salida).....	24
Figura 16. Simulación de entrada y salida de tensión del convertidor a $1037\text{W}/\text{m}^2$ (Rojo: entrada, azul: salida) .	24
Figura 17. Salida de tensión en el IGBT y en la bobina a $960\text{W}/\text{m}^2$ (Rojo: IGBT, azul: bobina)	24
Figura 18. Simulación de tensión en el IGBT y en la bobina a $960\text{W}/\text{m}^2$ (Rojo: IGBT, azul: bobina)	25

Lista de Tablas

Tabla 1. Estados de operación del generador fotovoltaico para seguimiento del MPP	17
Tabla 2. Componentes del convertidor CD/CD	19
Tabla 3. Características Controlador	21
Tabla 4. Parámetros nominales del Panel fotovoltaico	23
Tabla 5. Resultados de las pruebas de funcionamiento del sistema	24

Lista de Anexos

Anexo A. Diseño de sensores	29
Anexo B. Caracterización del panel solar	30

RESUMEN

Título: IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CD/CD PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE GENERADORES FOTOVOLTAICOS.¹²

Autores:

YULIANY GARCÍA CARRASCAL³

JESÚS MANTILLA GAMARRA⁴⁵

Palabras clave:

Electrónica de potencia, convertidores cd/cd, generadores fotovoltaicos, seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), perturbación y observación (P&O).

Descripción:

Ante el desarrollo de alternativas energéticas renovables como la energía solar fotovoltaica, se genera la necesidad de hacer de ellas una opción eficiente para obtener el mayor provecho posible de este tipo de fuentes de energía. La generación de energía solar fotovoltaica implica la utilización de paneles o generadores fotovoltaicos, cuyo funcionamiento depende de condiciones ambientales como irradiancia solar y temperatura y, además, está dado por una relación no lineal entre la corriente y tensión producidas por el mismo. Existe un punto de máxima potencia dado por una tensión y una corriente de máxima potencia, las cuales varían de acuerdo a las condiciones de operación del generador. Para garantizar que sea posible extraer la mayor potencia posible, se utilizan sistemas de control entre los que se destacan el seguimiento del punto de máxima potencia. El presente trabajo muestra la implementación de un convertidor CD/CD que cumple la función de elevar la tensión proveniente del generador fotovoltaico y sobre el cual opera el algoritmo del seguimiento del punto de máxima potencia, variando el ciclo de trabajo del convertidor y, de igual manera, su punto de operación para lograr que el sistema opere en el punto de máxima potencia en presencia de variaciones de irradiancia sobre el panel. Además se implementó una etapa de sensores de tensión para permitir acoplar los valores de tensión y corriente del generador al controlador que ejecuta el algoritmo. Los resultados obtenidos fueron comparados con simulaciones previas del sistema obtenidas mediante el software PSIM y, de esta manera verificar el correcto funcionamiento del montaje.

¹ Tesis de grado en modalidad de investigación

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: PhD. (c) María Alejandra Mantilla Villalobos-mmantilla@ieee.org, Codirector: PhD. Johann Farith Petit Suárez-jfpetit@uis.edu.co.

³ yuliany.garcia@correo.uis.edu.co

⁴ chucho.mantilla@outlook.com

⁵ El presente trabajo de grado hace parte de la tesis de doctorado de la estudiante y directora María Alejandra Mantilla Villalobos. Los autores otorgan todo el permiso necesario para que todo el contenido y los resultados presentados a continuación sean usados en buen uso por la estudiante de doctorado María Alejandra Mantilla Villalobos en la elaboración de su tesis doctoral.

ABSTRACT

Title: IMPLEMENTATION OF A DC/DC CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC GENERATORS' MAXIMUM POWER POINT TRACKING.⁶⁷

Authors:

YULIANY GARCÍA CARRASCAL

JESÚS MANTILLA GAMARRA

Keywords:

Power electronics, dc/dc converters, photovoltaic generators, maximum power point tracking (MPPT), perturbation and observation (P&O).

Description:

Considering the development of renewable energetic alternatives such as photovoltaics (PV), it comes up the need of make these alternatives an efficient choice to obtain as much advantage as possible from these kinds of energy sources. Photovoltaic generation implies the use of panels or photovoltaic generators, which operate depending on environmental conditions such as solar irradiance and temperature and, besides, work according to a non-linear relation between the current and the voltage produced by the generator. There is a maximum power point given by a maximum power current and voltage, which change according to generator's operation conditions. In order to assure the extraction of the maximum power possible, control systems are used like maximum power point tracking (MPPT) which stands out among them. This paper shows the implementation of a DC/DC converter which achieves the goal of boosting the voltage coming from the PV generator and the MPPT algorithm works on, varying the converter's duty cycle and, in the same way, its operation point to accomplish that the system works at the maximum power point in the presence of irradiance variations on the panel. Besides, a sensing stage was implemented to allow the reading of current and voltage values from the PV generator into the controller which executes the MPPT. Obtained results were compared with previous simulations made with PSIM and, in this way, to verify the correct working of the system.

⁶ Final undergraduate Project

⁷ Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: PhD. (c) María Alejandra Mantilla Villalobos-mmantilla@ieee.org.. Subdirector: PhD. Johann Farith Petit Suárez-jfpetit@uis.edu.co

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente necesidad global de reducir el impacto que tiene la generación de energía eléctrica sobre el medio ambiente, han surgido varias alternativas de energía renovable como la energía eólica o la solar. En el caso de Colombia, la generación de energía a partir de fuentes alternativa no es representativa comparada con la capacidad de generación instalada en todo el país [1].

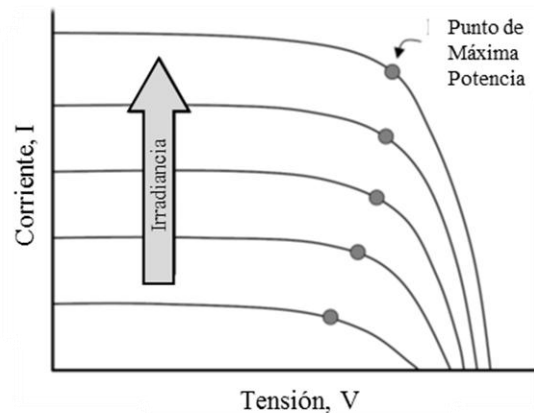
Colombia tiene un gran potencial en energías primarias, una muestra de esto es que cerca del 70% de la producción eléctrica es generada de manera hidráulica [1], gracias a la cantidad de agua presente en el territorio nacional. De la misma manera, Colombia se encuentra en una ubicación geográfica privilegiada y tiene varias regiones con climas que ofrecen buenas condiciones para la generación de electricidad a partir de energía solar. Partiendo de lo anterior, la generación de energía eléctrica por medio de paneles solares surge como una opción viable de energía renovable en Colombia.

Es necesario considerar que dentro del uso de las celdas fotovoltaicas como una alternativa energética, en su mayor parte limpia y renovable; aparece también la necesidad de hacer de ésta una opción eficiente para poder obtener el mayor provecho de esta fuente de energía.

Entre los diferentes elementos utilizados para la generación de energía solar se encuentra el generador o paneles fotovoltaicos, conformado por la conexión serie/paralelo de celdas fotovoltaicas [2]. El funcionamiento de las celdas fotovoltaicas está dado por una relación no lineal de corriente contra tensión como la mostrada por las curvas que aparecen en la Figura 1 para diferentes niveles de irradiancia. Estas características son particulares para cada celda y dependen de factores ambientales como la temperatura y la irradiancia [3] que, además, determinan la potencia entregada por una celda solar, la cual está

dada por el producto de la corriente y la tensión de la misma. El punto de máxima potencia (MPP, *Maximum Power Point*) es el producto de la tensión en el punto máximo (VMPP) y la corriente en el punto máximo (IMPP) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (PMPP).

Figura 1. Relación de Corriente contra Tensión del Generador Fotovoltaico



Fuente: Autores

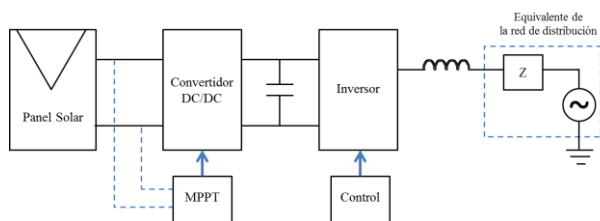
Teniendo en cuenta las anteriores características de operación, surge la necesidad de adecuar el funcionamiento del generador fotovoltaico. Para asegurar que la potencia generada siempre sea máxima se utilizan sistemas de control, entre los cuales se destaca el método de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT, Maximum Power Point Tracking*), utilizado para maximizar la energía entregada por el sistema fotovoltaico [4] mediante diferentes algoritmos.

Si el generador fotovoltaico va a ser conectado al sistema de distribución, es necesario realizar una conversión de la salida de tensión de DC que se obtiene del generador fotovoltaico a una señal sinusoidal, la cual es realizada por un inversor. Sin embargo, cuando el nivel de tensión a la salida del generador fotovoltaico no es suficientemente grande para el funcionamiento del inversor, se puede utilizar un convertidor que permita elevar la tensión de DC a la salida del generador. Un ejemplo de esta configuración se presenta en la Figura 2. Asimismo, este convertidor CD/CD es también controlado,

principalmente variando su ciclo de trabajo, para garantizar la operación del generador fotovoltaico en el punto de máxima potencia.

En este proyecto se mostrará la implementación de un convertidor CD/CD elevador con el fin de adecuar la tensión a la salida del generador y seguir la máxima potencia de éste. Se presenta la descripción de las diferentes etapas implementadas para el desarrollo del sistema. Para esto, el trabajo es dividido en 6 secciones. En la sección 2 se hace una descripción general de los generadores fotovoltaicos y sus características. La sección 3 muestra el método de MPPT implementado en el presente trabajo. En la sección 4 se hace referencia al funcionamiento y descripción de los convertidores CD/CD. La sección 5 presenta la descripción de las etapas del sistema junto con los dispositivos utilizados en cada etapa. Finalmente se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas, simulaciones y conclusiones del trabajo.

Figura 2. Diagrama de sistema de panel, convertidor e inversor para conectar a la red.



Fuente: Autores

1. GENERADORES FOTOVOLTAICOS

La energía solar fotovoltaica es una clase de energía eléctrica renovable obtenida directamente de la radiación de los rayos solares gracias al efecto fotoeléctrico de un determinado dispositivo; normalmente una lámina semiconductor denominada célula o celda fotovoltaica [5].

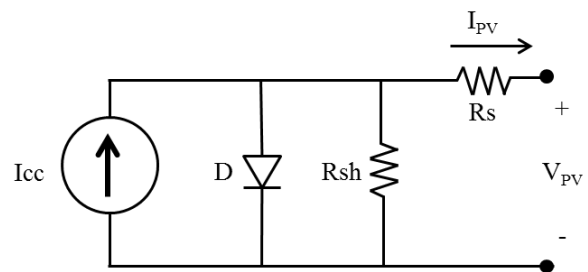
Las celdas fotovoltaicas convierten la energía proveniente de una fuente de luz en energía eléctrica.

Éstas están hechas de materiales semiconductores (normalmente silicio) que son especialmente tratados para formar dos capas con diferente dopaje (tipo p y tipo n) que forman un campo eléctrico, dando lugar a una cara positiva y otra negativa. Cuando la luz solar incide en la célula, se liberan electrones que pueden ser separados por el campo eléctrico, dando lugar a una corriente eléctrica [6].

La Figura 3 muestra el circuito eléctrico equivalente de una celda fotovoltaica, la cual está conformada por una fuente de corriente, I_{CC} , que representa la corriente generada por la radiación solar, un diodo y dos resistencias, R_s en serie y R_{sh} en paralelo. R_s representa las pérdidas causadas por los diferentes contactos y conexiones y R_{sh} representa la corriente de fuga del diodo [7] [8]. En la Figura 3, las variables I_{PV} y V_{PV} corresponden a la corriente y a la tensión generadas por el panel respectivamente.

Para obtener una tensión y una corriente apropiadas para diferentes aplicaciones, se interconectan varias celdas solares en serie-paralelo para formar un módulo o panel fotovoltaico, a su vez estos pueden interconectarse entre sí para formar lo que se conoce como un arreglo fotovoltaico [9] o generador fotovoltaico.

Figura 3. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico

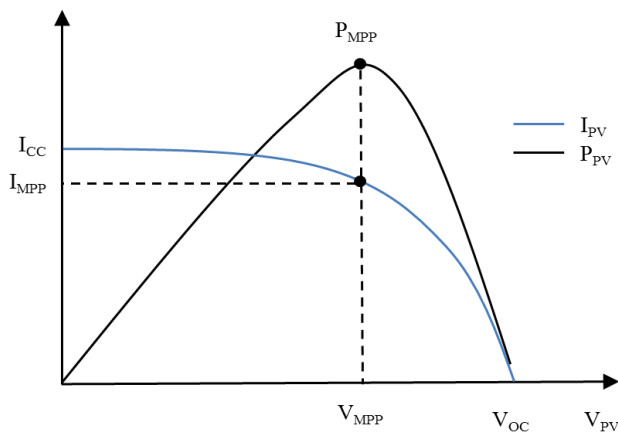


Fuente: Autores

La Figura 4 muestra las curvas de corriente contra tensión y potencia contra tensión características de una celda fotovoltaica. Se observa en la curva de potencia, la existencia de un máximo denominado máximo punto de potencia (MPP) al cual le corresponden valores de corriente en el punto de máxima potencia

I_{MPP} y de tensión en el punto de máxima potencia V_{MPP} . Dicho punto de máxima potencia varía continuamente pues depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia [4]. Esta variación plantea la necesidad de realizar un algoritmo capaz de modificar la tensión a la salida de la celda de manera tal que la energía aprovechada sea la máxima [4].

Figura 4. Gráficas de corriente-tensión y potencia-tensión de un panel fotovoltaico



Fuente: Autores

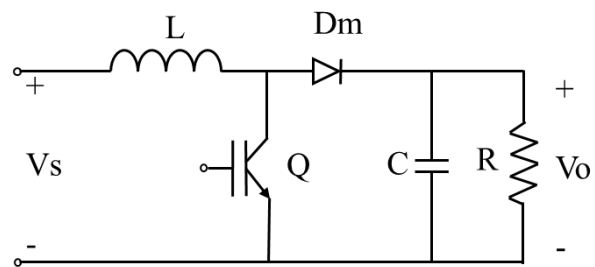
2. CONVERTIDORES CD/CD

Diversas aplicaciones basadas en la sostenibilidad energética como la energía fotovoltaica, la utilización de pilas de combustible y almacenamiento de energía en baterías; requieren conversores CD/CD para convertir las tensiones y corrientes de un nivel DC a otro [10]. Además de estas aplicaciones directas, los convertidores CD/CD se utilizan para el control de tracción de motores, automóviles eléctricos, tranvías, grúas marinas y montacargas, entre otros; ya que proporcionan un control uniforme de aceleración, gran eficiencia y rápida respuesta dinámica [11].

De acuerdo a su relación con el nivel de entrada los convertidores CD/CD se dividen en diferentes topologías: reductora o *buck*; elevadora o *boost* y topologías híbridas como *flyback*, *sepic* y *cuk* [10].

Para esta aplicación se elige el convertidor CD/CD elevador o *boost*, ya que se desea una tensión de salida mayor a la tensión de entrada del panel, para su posterior acople a la red por medio de un inversor. El convertidor CD/CD mostrado en la Figura 5 es un circuito que transforma una tensión continua, en este caso la tensión de salida del generador fotovoltaico (por lo general no regulada), en otra también continua y regulada.

Figura 5. Convertidor CD/CD elevador o boost



Fuente: Autores

El funcionamiento de los convertidores CD/CD consiste en el almacenamiento de energía y en la transferencia de ésta en un periodo de tiempo dado según un ciclo de trabajo D ($0 < D < 1$) y un periodo de conmutación T . Este periodo de tiempo determina la cantidad de energía cedida a la carga [12]. A su vez, el ciclo de trabajo es controlado por medio del MPPT, lo que permite aumentar el nivel de tensión de salida hasta el requerido en esta aplicación y asegurar la extracción de la máxima potencia del panel.

3. MPPT

Cuando el generador fotovoltaico se conecta a la red por medio de un convertidor CD/CD, se utilizan algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), los cuales operan variando el valor de ciclo útil del convertidor. Existen gran variedad de algoritmos como por ejemplo: perturbar y observar, conductancia incremental, tensión constante, entre otros [4]. Estos algoritmos varían en su complejidad, su velocidad de convergencia al punto de máxima potencia, los sensores utilizados, su costo, su

efectividad y otros aspectos [13]. A continuación se presenta el método implementado en este proyecto.

3.1. Hill Climbing/P&O

El algoritmo perturbar y observar (P&O), que es uno de los métodos más utilizados debido a la simplicidad en su funcionamiento, consiste en variar el ciclo útil de un convertidor CD/CD de potencia conectado al panel fotovoltaico, dependiendo del punto de operación en que se encuentre. Con el cambio del ciclo útil se modifica la tensión extraída del arreglo fotovoltaico y, por consiguiente, la potencia obtenida; tratando así de llegar al punto de máxima potencia [4].

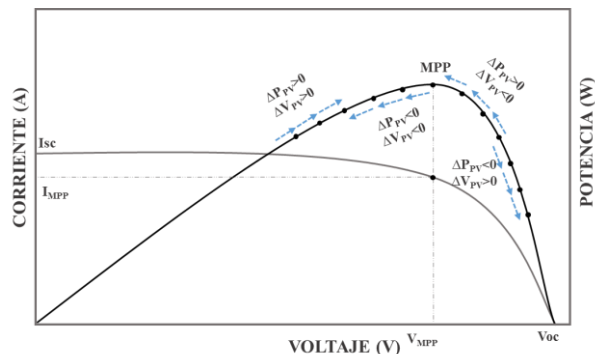
Este método se encarga de perturbar periódicamente (es decir, aumentar o disminuir) el ciclo de trabajo (D) y posteriormente comparar la potencia de salida (P_{PV}) actual del generador con la potencia de salida en un instante anterior. Si la perturbación conduce a un aumento en la potencia del panel, la perturbación posterior se hace en la misma dirección y, de igual forma, si conduce a una disminución, la perturbación se realiza en la dirección opuesta. De esta manera, se busca continuamente la condición de potencia máxima [13].

Por tanto, este método se basa principalmente en comparar la variación de la potencia y la tensión del panel, estableciendo así en qué posición de la curva característica se encuentra, como se muestra en la Figura 6. Por ejemplo, si la variación de potencia del panel es positiva y la variación de la tensión es positiva, la tensión de salida del panel debe aumentar para llegar al punto de máxima potencia, por consiguiente el valor del ciclo de trabajo debe disminuir.

La Tabla 1 resume los cuatro estados de operación del generador fotovoltaico. Una particularidad de este método es que el sistema oscila alrededor del MPP y, aunque dicha oscilación se puede minimizar mediante la reducción del tamaño del paso de la perturbación, esto traería consigo una ralentización del MPPT. Una solución a esta situación es tener un tamaño variable

de perturbación que se hace más pequeño cuando el sistema se acerca al MPP.

Figura 6. Principio de funcionamiento de método P&O



Fuente: Autores

Tabla 1. Estados de operación del generador fotovoltaico para seguimiento del MPP

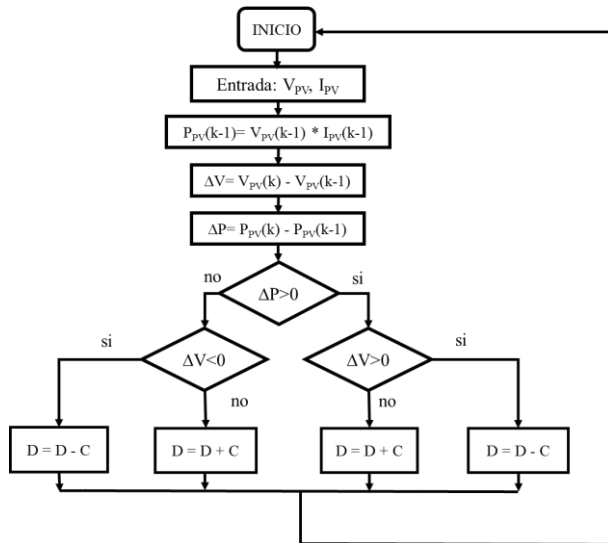
ΔV_{PV}	ΔP_{PV}	ΔD
Positivo	Positivo	Aumentar la tensión de salida del panel, por ende disminuir el ciclo.
Positivo	Negativo	Disminuir la tensión de salida del panel, por ende Aumentar el ciclo.
Negativo	Positivo	Disminuir la tensión de salida del panel, por ende Aumentar el ciclo.
Negativo	Negativo	Aumentar la tensión de salida del panel, por ende disminuir el ciclo.

Fuente: Autores

Para la implementación del método P&O se requieren generalmente dos sensores, uno para medir la tensión del generador fotovoltaico y otro para la corriente, variables necesarias para calcular la potencia entregada por el panel y así monitorear el MPP. La

Figura 7 muestra el diagrama desarrollado para la implementación del MPPT con el método de perturbación y observación. En el diagrama, la variable C representa el parámetro de perturbación

Figura 7. Diagrama del algoritmo P&O



Fuente: Autores

4. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS ETAPAS DEL SISTEMA

La implementación final del convertidor CD/CD realizada en este trabajo consta de cinco etapas que permiten desde la adquisición de los valores de tensión y corriente provenientes del panel hasta la variación del ciclo del dispositivo de conmutación mediante el algoritmo del MPPT.

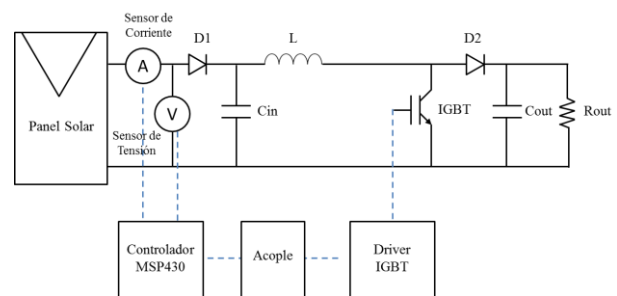
La Figura 8 muestra las diferentes etapas que componen el sistema. Estas etapas cumplen la función de adaptar las señales provenientes del panel fotovoltaico para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia y acoplar de nuevo la señal de control al convertidor.

Las etapas que componen el sistema son las siguientes:

4.1. Convertidor CD/CD

Además de los elementos presentados en el esquema de la Figura 5, se utiliza un diodo de entrada como protección para el panel fotovoltaico ante corrientes inversas que puedan presentarse en el circuito del convertidor. De igual manera, se emplea un capacitor de entrada para la tensión proveniente del generador fotovoltaico y dar a esta señal un comportamiento más estable. Los elementos que componen el convertidor se presentan en la Tabla 2.

Figura 8. Diagrama de etapas del sistema



Fuente: Autores

Dentro de los elementos mencionados anteriormente, se encuentra una bobina como elemento almacenador de energía, un diodo que permite los dos modos de operación del convertidor, el dispositivo de conmutación implementado mediante un IGBT (*Insulated-gate Bipolar Transistor*) y una carga RC para obtener una salida de tensión constante.

4.1.1. Selección de componentes

Un parámetro importante para definir algunos de los elementos del convertidor es la frecuencia de operación del sistema, que influye en las pérdidas por conmutación y en la selección de componentes de otras etapas. Para el caso de la aplicación utilizada en este proyecto, se contaba previamente con el IGBT SKM50GAL123D de SEMIKRON y por esta razón, se partió de las características del mismo como referencia para la definir los parámetros de los demás dispositivos que componen el convertidor.

Tabla 2. Componentes del convertidor CD/CD

Elemento	Valor o Referencia
Diodo de entrada	SEMIKRON SKR50/04
Capacitor de entrada	100 uF / 250 V
Bobina	30 mH / 10 A
IGBT	SEMIKRON SKM 50GAL123D
Diodo	Integrado al IGBT
Capacitor de salida	2200 uF / 450 V
Resistencia de salida	100-300 Ω

Fuente: Autores

Se estableció como frecuencia de conmutación para los pulsos que controlan el convertidor una frecuencia de 10 kHz.

Otro parámetro a tener en cuenta dentro del diseño del convertidor corresponde a la potencia de salida. Para este caso específico, se cuenta con un generador fotovoltaico de 50 W, y este valor fue también considerado como la potencia de salida nominal sin considerar las pérdidas en los componentes del convertidor.

Por otro lado, tal como se observa en la Figura 8, la etapa comprendida por el inversor de potencia, el equivalente de la red de distribución y el filtro de conexión a la red no son considerados en este proyecto. Por tal motivo, a la salida del convertidor de potencia se conecta una resistencia de carga utilizada para disipar la potencia generada por los paneles solares.

El valor de la resistencia de salida fue seleccionado de tal forma que el convertidor realice una operación de elevación de tensión según la potencia entregada por el panel. Por este motivo, se realizó un arreglo de resistencias conectadas a la salida que brinda la facilidad de trabajar con valores de resistencia de 100 Ω , 200 Ω y 300 Ω a 100 Ω , para permitir la posibilidad de que el sistema pueda trabajar con tensiones de salida diferentes según el valor de resistencia utilizado y la potencia generada por el panel.

Partiendo de estos parámetros, es posible definir los valores de bobina y de capacitor apropiados para la aplicación. La selección de la bobina es un factor crítico en el diseño del convertidor, debido a que es el elemento que permite que se cumpla el principio de operación de los convertidores elevadores. De acuerdo entonces a la ecuación (1) se conoce el valor de inductancia mínimo que debe tener la bobina para que el convertidor opere en modo continuo, es decir que la corriente oscile entre dos valores mayores que cero.

$$L_C = L = \frac{D(1-D)R}{2f} \quad (1)$$

Para calcular el valor crítico o mínimo de inductancia se toma un valor de ciclo de 0.5, ya que este valor lleva a un mayor rizo de corriente a la salida para un mismo valor de inductancia. Con este ciclo de trabajo se realizaron los cálculos de los parámetros iniciales de funcionamiento del convertidor. Se obtiene entonces de (1) un valor mínimo de inductancia de 1.25 mH.

Se puede apreciar en la Figura 9 el comportamiento simulado del sistema para el circuito del convertidor sin control y se observa que a medida que el valor de la inductancia es mayor, se obtiene un comportamiento con menos rizado de la corriente que pasa por la bobina.

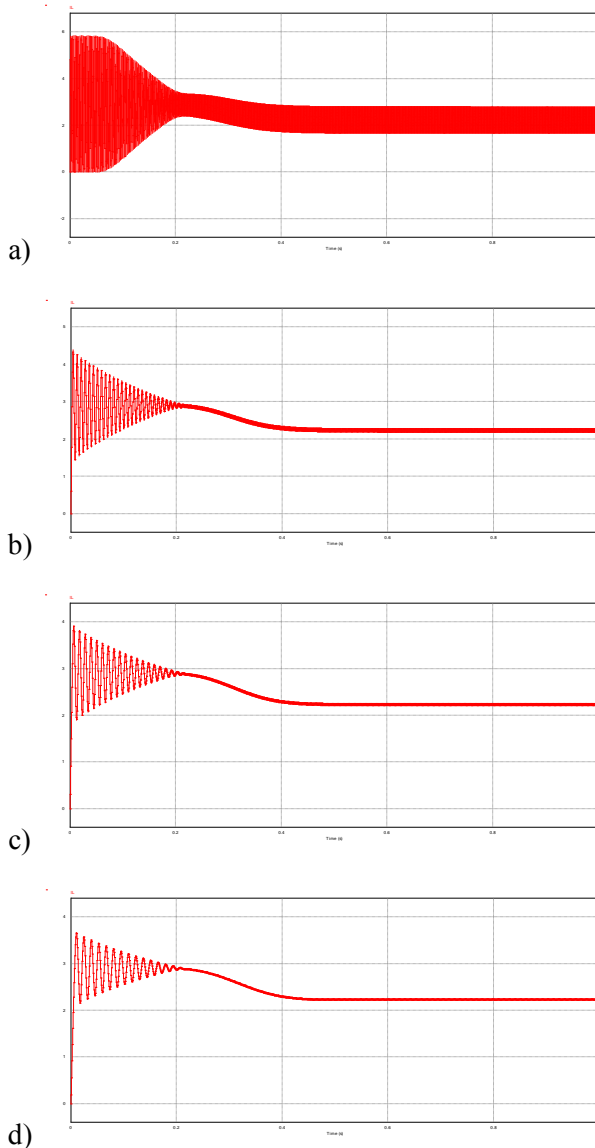
Para la implementación y desarrollo de las pruebas de este proyecto se utilizó una bobina de 30 mH de 10 A de corriente nominal, para tener un rango de trabajo lo suficientemente amplio ante la presencia de picos de corriente en la bobina. Además, se dispuso espacio dentro del montaje para utilizar bobinas con otros valores de inductancia y corriente nominal para implementaciones con otros generadores fotovoltaicos.

Otro componente que se tuvo en cuenta fue la capacitancia de salida definida de manera similar que la inductancia crítica, mediante la ecuación (2) obteniendo un valor de 125 nF. Sin embargo, se dispone de un inversor (SEMITEACH IGBT) que se planea conectar al convertidor implementado en este

proyecto, el cual cuenta con dos capacitores de 2200 μF en serie, razón por la cual se seleccionó éste como el valor de capacitancia de salida, para simular la entrada del inversor que se conecta al convertidor, a pesar de la notable diferencia con respecto al valor crítico de capacitancia.

$$C_c = C = \frac{D}{2fR} \quad (2)$$

Figura 9. Simulación de la corriente en la bobina para distintos valores de inductancia. a) 1.25mH b) 15mH c) 30mH d) 50mH



Fuente: Autores

Finalmente, para el diodo de entrada se seleccionó una referencia de características similares al diodo integrado al IGBT.

4.2. Sensores

Una etapa de gran importancia dentro del sistema corresponde a la de medición de tensión y de corriente en uno o varios puntos del convertidor dependiendo del método de control utilizado. La lectura de estos valores es fundamental para el desarrollo de los diferentes algoritmos de MPPT. Para el desarrollo de este trabajo, es necesario el uso de un sensor de tensión y uno de corriente en la entrada del convertidor como se observa en la Figura 8.

Estos sensores fueron implementados mediante transductores cuyos niveles de salida fueron ajustados, por medio de una etapa de ganancia, para la posterior lectura por parte del convertidor analógico-digital, que se encuentra integrado en el microcontrolador utilizado. Ver anexo A.

4.3. Controlador

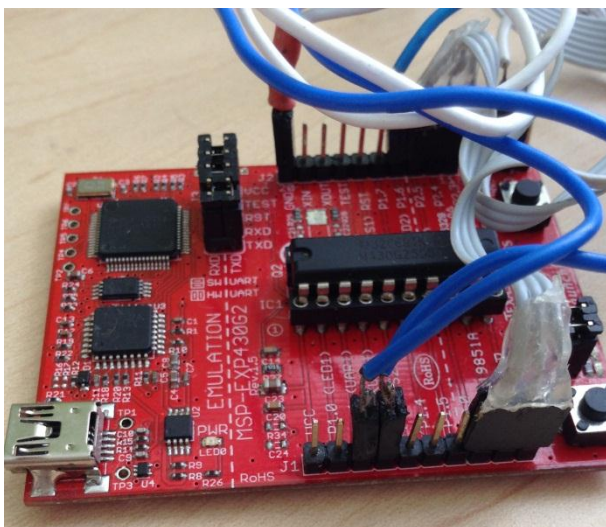
La etapa del controlador del sistema corresponde a la encargada de ejecutar el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico. Para la implementación del algoritmo, se realiza la lectura de las señales medidas por los sensores a través de un módulo ADC (*Analog-to-digital Converter*) que, luego de ser procesadas dentro del algoritmo del MPPT, se utilizan para generar una señal PWM que realiza la conmutación del IGBT, modificando así su ciclo útil para lograr que el panel fotovoltaico entregue la máxima potencia bajo una irradiancia específica.

El microcontrolador con el cual se desarrolló la etapa de control corresponde al MSP430G2553 integrada en la tarjeta de desarrollo MSP-EXP430G2 LaunchPad del fabricante *Texas Instruments* (ver Figura 10), cuyas características generales se muestran en la Tabla 3.

Esta tarjeta de desarrollo fue escogida principalmente por su frecuencia de operación que es suficiente para el desarrollo de esta aplicación y que además tiene

cuatro diferentes rangos en los que se puede operar. De la misma manera, cuenta con una cantidad adecuada de módulos ADC para la adquisición de los datos y suficientes puertos de propósito general para la visualización de las variables de control en tiempo real por medio de una pantalla LCD; y un módulo USB que permite una rápida y fácil configuración del dispositivo.

Figura 10. Tarjeta de desarrollo MSP-EXP430G2 LaunchPad



Fuente: Autores

Además de las anteriores características consideradas, se tuvieron en cuenta, entre otras, el precio del dispositivo, el bajo consumo de potencia y su portabilidad. Es importante mencionar que el microcontrolador no cuenta con una amplia memoria RAM, pero no fue un factor crítico para la implementación del algoritmo.

4.4. Acople

La etapa de acople entre el microcontrolador y el *driver* del IGBT consiste principalmente en dos elementos: un búfer y un optoacoplador. La función principal del optoacoplador es la de aislar la tierra digital (etapa de control) de la tierra de potencia correspondiente a la conexión con el *driver* que controla el IGBT. Además, eleva la tensión a la salida

del PWM, de 3.6 V a 15 V necesarios para producir la conmutación en el *driver*.

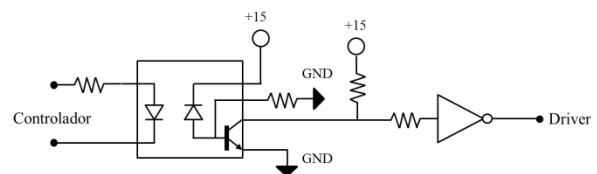
Tabla 3. Características Controlador

Característica	Valor o Referencia
Empaquetado	20PDIP
Tensión de operación	1.8 V – 3.6 V
Frecuencia	16 MHz
Memoria Flash	16 kB
Memoria RAM	512 B
ACMP (Comparador analógico)	Soportado
ADC	8 canales a 10 bits
I2C	Soportado
SPI	Soportado
TMP (Temporizador)	Soportado, 2 módulos

Fuente: Fabricante

Otro elemento que compone esta etapa, como se puede apreciar en la Figura 11, es el búfer que cumple la función de realizar un acople de impedancias entre el optoacoplador y el *driver*, debido a que la impedancia de salida del optoacoplador es muy baja comparada con la impedancia de entrada del *driver*.

Figura 11. Diagrama esquemático de etapa de acople

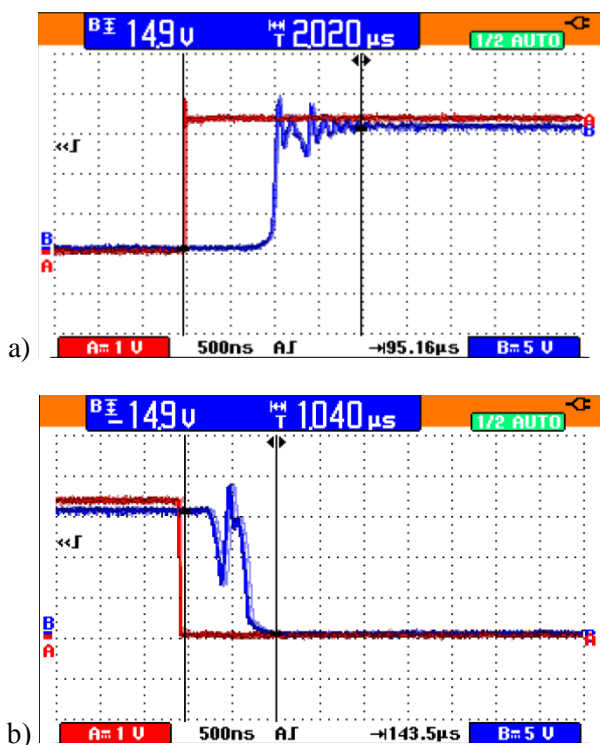


Fuente: Autores

Es indispensable tener en cuenta que la implementación de las diferentes etapas para adaptar la señal de control al convertidor implica un retardo entre estas señales. Para este caso particular, la frecuencia de operación es de 10kHz que corresponde con un periodo de 100 μ s, por lo cual, el retardo debe ser despreciable con respecto al periodo de la señal.

La medición de los retardos entre la señal generada por el microcontrolador y la salida de la etapa de acople se puede realizar midiendo la diferencia en los tiempos de subida y de bajada de las respectivas señales. La Figura 12 corresponde con las mediciones de los tiempos de subida y de bajada, tomadas con ayuda de un osciloscopio, y mostrando un retardo de 2 μs en el tiempo de subida y 1 μs en el tiempo de bajada, con sus respectivos niveles de tensión (3.6 V y 15 V).

Figura 12. Retardos en el pulso debido a la etapa de acople. a) Retardo de subida b) Retardo de bajada



Fuente: Autores

El retardo total corresponde a 3 μs , el cual se puede considerar despreciable con respecto a la señal de control.

4.5. Driver

Finalmente se encuentra el *driver* del IGBT, cuya función principal es proveer la corriente de puerta necesaria para su operación. De igual manera,

constituye una interfaz entre el módulo IGBT y el controlador, ofreciendo aislamiento y protección.

Emplear este dispositivo es una recomendación por parte del fabricante del IGBT, ya que además de las anteriores características, brinda otras prestaciones como disminución de ruido, manejo de pulsos provenientes del controlador y el ajuste de los niveles de la señal de control de -7 V a 15 V.

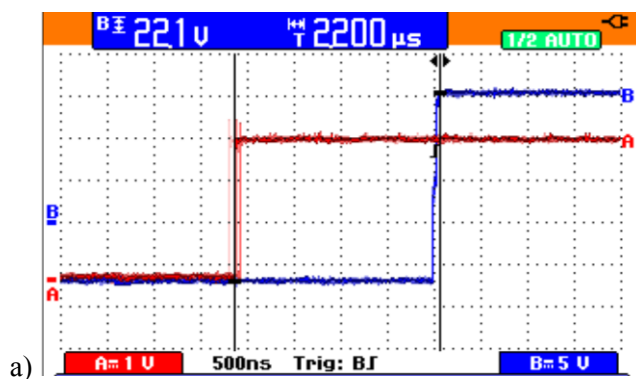
El *driver* utilizado fue el SKYPER 32 R de SEMIKRON junto con la tarjeta BOARD 1 SKYPER 32, del mismo fabricante, que constituye un adaptador para el *driver* y que puede ser ajustada para permitir adaptación y optimización dependiendo del módulo IGBT utilizado.

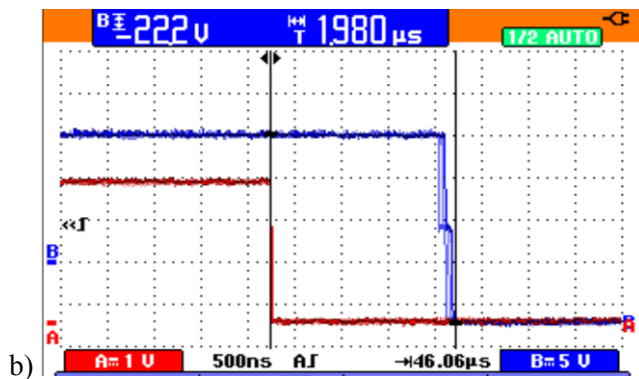
En la Figura 13 se observan mediciones, tomadas con un osciloscopio, de las diferencias entre los tiempos de subida y bajada de la señal del *driver* con respecto a la señal de control.

Es posible observar que la diferencia de tiempos o retardo entre las señales es cercano a 2 μs , lo cual no representa una condición que pueda afectar el comportamiento del sistema.

El montaje final del convertidor implementado se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 13. Retardo total debido al acople y al driver. a) Retardo de subida b) Retardo de bajada



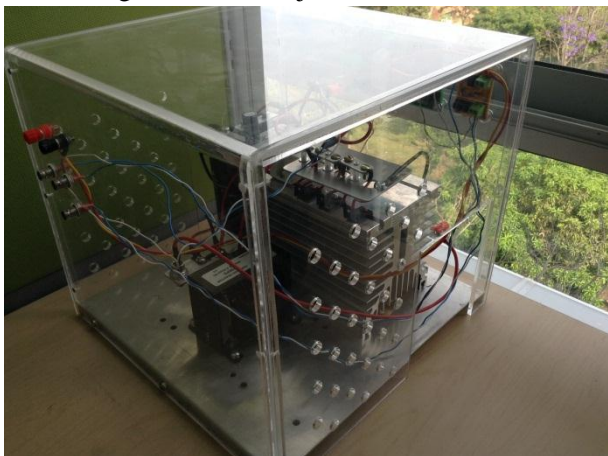


Fuente: Autores

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron pruebas del funcionamiento del sistema midiendo los valores de tensión de entrada y de salida del convertidor y de la potencia, además de la señal de tensión de la bobina. Los resultados obtenidos fueron comparados con los respectivos datos proporcionados por simulaciones realizadas mediante el software PSIM que dieron una idea aproximada de lo que se esperaba al implementar el sistema.

Figura 14. Montaje final del sistema



Fuente: Autores

Para las pruebas se utilizó un panel fotovoltaico cuyos valores nominales se encuentran especificados en la Tabla 4 para condiciones estándar de irradiancia y temperatura, 1000 W/m^2 y 25°C , respectivamente. Cabe mencionar que de acuerdo a la caracterización del generador fotovoltaico (ver Anexo B), fue

apropiado ajustar algunos valores para que el modelo se acercara más a las características reales del panel, teniendo en cuenta que no se contaba con la hoja del panel para definir un modelo preciso en la herramienta de simulación.

Tabla 4. Parámetros nominales del Panel fotovoltaico

Parámetro	Valor
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	22.03 (V)
Corriente de corto circuito (I_{sc})	2.92 (A)
Potencia nominal	50 (W)
Tensión de máxima potencia (V_{mpp})	18.30 (V)
Corriente de máxima potencia (I_{mpp})	2.73 (A)

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos fueron registrados en la Tabla 5, donde se muestran los valores de tensión, corriente y potencia tanto de entrada como de salida, además del ciclo de trabajo al cual conmutaba el IGBT, para tres condiciones diferentes de irradiancia. Con la ayuda de la pantalla LCD que se agregó al sistema de control se obtuvieron los datos de entrada y el ciclo de trabajo en tiempo real, los datos de salida fueron tomados con un osciloscopio Fluke 199c, el cual permitió obtener no solo los niveles de DC de la salida de tensión, sino también las formas de onda de la tensión en la bobina y del IGBT entre puerta y emisor.

En la Figura 15 se muestran las señales de entrada y salida de tensión del sistema obtenidas por medio del osciloscopio para la prueba con irradiancia de 1037 W/m^2 . De igual forma, la Figura 16 presenta datos de simulación, los cuales muestran el satisfactorio funcionamiento del sistema, ya que existe concordancia entre el modelo teórico planteado en simulación y los resultados obtenidos en la práctica, mostrando un correcto seguimiento del punto de máxima potencia en el nivel de irradiancia nominal.

Asimismo se observan las diferencias entre la potencia de entrada y salida, correspondientes a las pérdidas presentes en los diferentes componentes, razón por la

cual no se realizaron pruebas a bajas irradiancias, por la baja potencia producida por el generador fotovoltaico utilizado. Dichas pérdidas dependen de diferentes factores como la frecuencia de operación y la impedancia de los elementos utilizados en el circuito, tenidos en cuenta en la simulación.

Tabla 5. Resultados de las pruebas de funcionamiento del sistema

Irradiancia [W/m ²]	914	951	1037
Tensión de entrada [V]	31,82	33,35	34
Corriente de entrada [A]	1,45	1,39	1,66
Potencia de entrada [W]	46,14	46,36	56,44
Ciclo de trabajo	69,90%	69,90%	72,20%
Tensión de salida [V]	85,3	88	100
Potencia de salida [W]	36,38	38,72	50,00

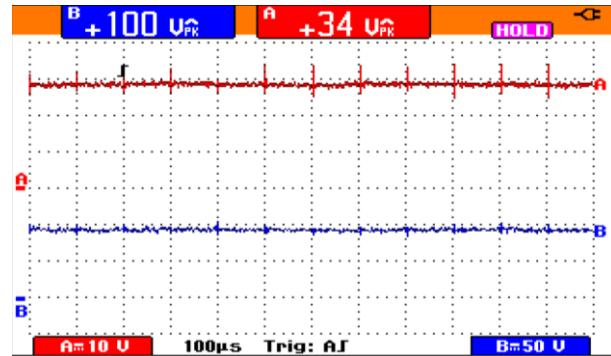
Fuente: Autores

Dentro de los resultados obtenidos también se observaron la tensión de puerta-emisor del IGBT y la tensión de la bobina, obtenidos mediante simulación (ver Figura 17 y Figura 18) mostrando el correcto funcionamiento de la conmutación realizada por el IGBT.

Los resultados obtenidos muestran el sobresaliente desempeño del algoritmo de control y del convertidor de potencia implementado, ya que se alcanza el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico para diferentes valores de irradiancia y se logra elevar la tensión a la salida del panel, manteniendo a su vez la

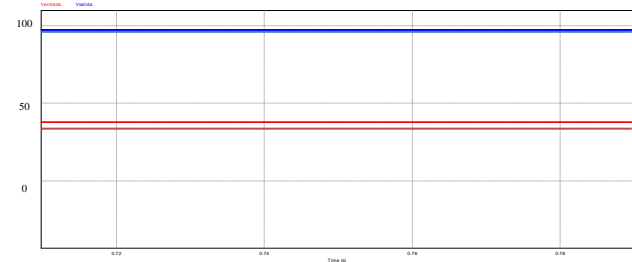
corriente por el panel solar y la tensión de salida del convertidor con un rizo reducido.

Figura 15. Entrada y salida de tensión del convertidor a 1037W/m² (Rojo: entrada, azul: salida)



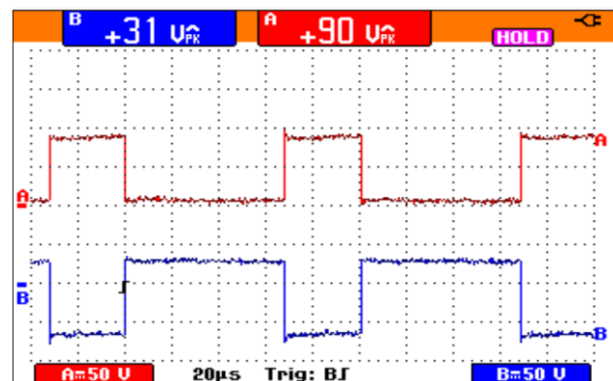
Fuente: Autores

Figura 16. Simulación de entrada y salida de tensión del convertidor a 1037W/m² (Rojo: entrada, azul: salida)



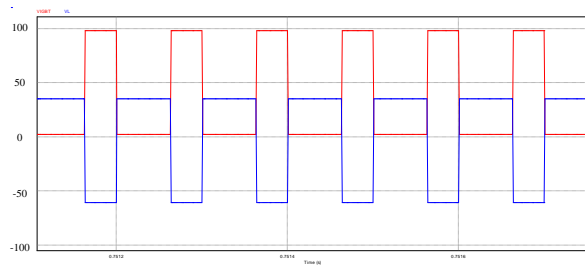
Fuente: Autores

Figura 17. Salida de tensión en el IGBT y en la bobina a 960 W/m² (Rojo: IGBT, azul: bobina)



Fuente: Autores

Figura 18. Simulación de tensión en el IGBT y en la bobina a 960 W/m^2 (Rojo: IGBT, azul: bobina)



Fuente: Autores

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se expuso el montaje de un convertidor CD/CD sobre el cual se implementó un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para generadores fotovoltaicos. Los resultados obtenidos muestran el buen funcionamiento del sistema y del algoritmo de control implementado para aplicaciones en donde se requiera seguir la máxima potencia de generadores fotovoltaicos para condiciones variables de irradiancia, temperatura y carga.

Durante el desarrollo del prototipo, se implementó una etapa de sensores que permitió captar las señales de tensión y corriente provenientes del generador fotovoltaico y posteriormente adecuarlas para el funcionamiento del algoritmo del MPPT.

El seguimiento del punto de máxima potencia fue implementado en un microcontrolador que permitió la lectura de los datos provenientes de los sensores implementados y realizar el cálculo del ciclo de trabajo del convertidor mediante el método de perturbación y observación, mostrando que este controlador de bajo costo y baja potencia es apto para este tipo de aplicación.

La implementación realizada es un primer paso para la futura interconexión de generadores fotovoltaicos a la red eléctrica ya que, además de seguir el punto de máxima potencia del generador, la tensión de salida es

elevada de tal forma que posteriormente se pueda considerar el uso de un inversor.

7. OBSERVACIONES

Para la implementación de próximos prototipos, es apropiado considerar el diseño de la bobina del convertidor, ya que sus características varían con respecto a la frecuencia de operación afectando su comportamiento, el cual influye en el desempeño del sistema.

Es posible mejorar el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia desarrollando un controlador que tenga una respuesta más rápida ante cambios bruscos de irradiancia y que sea más robusto ante posibles perturbaciones en la tensión del condensador de salida, las cuales se pueden generar tras la interconexión del sistema a la red.

REFERENCIAS

- [1] Upme. (2013) Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – Octubre de 2013. [Online]. Available: <http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2013/boletin-October%202013.pdf>
- [2] C. Castellanos and Quiñones G. *Integración de sistemas fotovoltaicos a la red: técnicas de control para el seguimiento del punto de máxima potencia*. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [3] S. L. Brunton, C. W. Rowley, S. R. Kulkarni, and C. Clarkson, "MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PHOTOVOLTAIC OPTIMIZATION i PV v Array," *ticom*, pp. 13-16, 2009.
- [4] L. Ruiz, J. Beristáin, I. Sosay J. Hernández. *Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar*. RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, 2010.
- [5] C. Tumbaco and R. Parrales. *Diseño del Control y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Basado en Módulos de Paneles Fotovoltaicos de un Sistema Monofásico Desconectado de la Red y Baterías como Unidad de Almacenamiento*. Tesis de Pregrado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010.
- [6] J. NELSON (2002): *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press. London.
- [7] J. Kouta, A. El-Ali, N. Moubayed, and R. Outlib "Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion system", International Conference on Renewable Energy and PowerQuality (ICREPQ'08), Santander, Spain, March 12-14 2008.
- [8] Joe-Air Jiang, Tsong-Liang Huang, Ying-Tung Hsiao and Chia-Hong Chen "Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic

Power Systems”, Tamkang Journal Science and Engineering, vol. 8, pp. 147 – 153, 2005.

- [9] Rashid Muhammad H. and Lana Char “*Solar Power Conversion*” *Power Electronics Handbook*, Capítulo 26, pp. 661 – 672, Academic Press, Segunda edición, 2007.
- [10] N. Mohan and T. M. Undeland. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed, Wiley India, 2007.
- [11] M. H. Rashid. *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 2nd ed, Pearson Educación, 2004.
- [12] M. González and A. Alzate. *Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional*. REVISTA TECNURA, 2010.
- [13] T. Esum and P. Chapman. *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2007.

BIBLIOGRAFÍA

- BRUNTON, S. L., ROWLEY, S. R., Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization I PV V Array. Ticom, pp. 13- 16, 2009.
- CASTELLANOS, Carol, QUIÑONES, Giovanni. Integración de Sistemas Fotovoltaicos a la Red: Técnicas de Control para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia. Bucaramanga. 2013. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisico-Mecánicas.
- ESRAM, T., CHAPMAN, P. Comparison of photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2007.
- GONZÁLEZ M., ALZATE, A. Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional. REVISTA TECNURA, 2010.
- JIANG, Joe-Air, HUANG, Tsong-Liang, HSIAO, Ying-Tung, CHEN Chia-Hong. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Power Systems. Tamkang Journal Science and Engineering, vol. 8, pp. 147 – 153, 2005.
- KOUTA, J., EL-ALI, A., MOUBAYED, N. OUTLIB, R. Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion system. International Conference on Renewable Energy and PowerQuality (ICREPQ'08), Santander, Spain, March 12-14 2008.
- MOHAN, N., UNDELAND, T. M. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Tercera edición. Wiley India, 2007.
- NELSON, J. The Physics of Solar Cells. Imperial College Press. London. 2002
- RASHID, M. Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Segunda edición, Pearson Educación, 2004.
- RASHID, Muhammad, LANA Char. Solar Power Conversion PowerElectronics Handbook, Capítulo 26, pp. 661 – 672, Academic Press,Segunda edición, 2007.
- RUIZ, L., BERISTÁIN, K., SOSAY I., HERNÁNDEZ, J. Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, 2010.
- TUMBACO, Christian., PARRALES, Román. Diseño del Control y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Basado en Módulos de Paneles Fotovoltaicos de un Sistema Monofásico Desconectado de la Red y Baterías como Unidad de Almacenamiento. Tesis de Pregrado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Guayaquil, Ecuador. 2010.
- UPME. Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – Octubre de 2013. {En línea}. Fecha {10 de enero de 2014}. Disponible en:
(<http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2013/boletin- Octubre%202013.pdf>).

ANEXOS

A Diseño de sensores

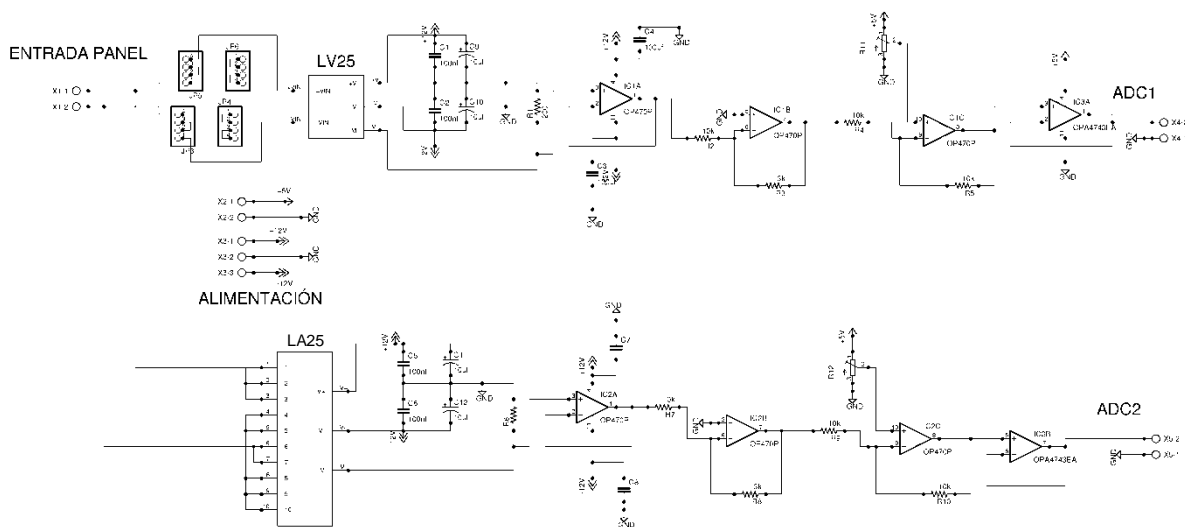
Para el correcto funcionamiento de los algoritmos MPPT, es necesario tener medidas de tensión y corriente a la entrada del convertidor CD/CD. Por tal motivo, se hace imprescindible contar con sensores adecuados que brinden confiabilidad a las medidas con las que se realizan los algoritmos para su correcto funcionamiento y que, además, se puedan acoplar al controlador o sistema de desarrollo utilizado para la implementación del MPPT.

Dentro de la aplicación desarrollada en este proyecto, se diseñaron dos sensores para medir tanto la tensión como la corriente de entrada del convertidor para la lectura de los valores de entrada al circuito que provienen del generador fotovoltaico, con las cuales se monitorean la potencia y tensión de entrada necesarias para la implementación del algoritmo de perturbación y observación que se desarrolló. El montaje realizado se muestra en la Figura 19, que corresponde al esquema de la tarjeta en la que se encuentran los dos sensores.

A.1 Sensor de tensión

El sensor de tensión cuenta principalmente con 3 etapas. La primera etapa corresponde al transductor de tensión LV-25, el cual cuenta con un amplio rango de entrada y ofrece precisión en la medida que se requiere para la aplicación, y el circuito indicado por el fabricante para la utilización del transductor. A continuación se encuentra una etapa de ganancia que se encarga de tomar los valores medidos, que se encuentran entre 0 V y 100 V, y ajustarlos en un rango entre 0 V y 3.6 V para la lectura realizada por el módulo ADC del sistema de desarrollo utilizado. Finalmente cuenta con una etapa de seguidor o búfer para el acople de impedancia con la tarjeta.

Figura 19. Diagrama esquemático de sensores de tensión y corriente



Fuente: Autores

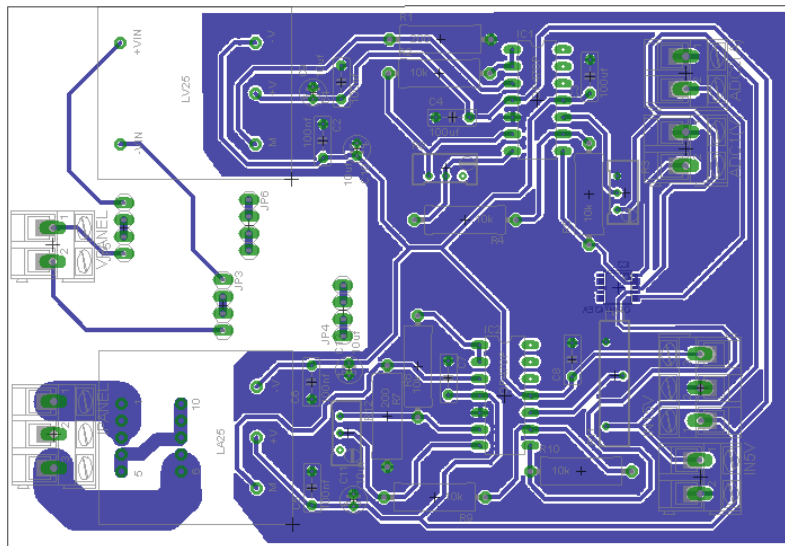
A.2 Sensor de corriente

El principio de funcionamiento del sensor de corriente es muy similar al de tensión. La principal diferencia entre ambos se encuentra en el transductor, debido a que ambos cuentan con una etapa de ganancia para ajustar la medida que va a ser leída, que se encuentra en el rango de 0 a 12 A, entre 0 V y 3.6 V y la etapa de seguidor de

tensión. El transductor utilizado para la medición de corriente es el LA-25, el cual posee un sistema de pines para ajustar los niveles de corriente que se pueden medir. De la misma manera, el esquema del diseño del sensor de corriente se encuentra en la Figura 19.

Para la implementación del sensor, se realizó el circuito impreso mostrado en la Figura 20 en el cual se realizan las conexiones respectivas para tomar la medida de las señales del generador fotovoltaico y se ajustan las señales para la medición en la etapa de control.

Figura 20. Diseño de circuito impreso de sensores



Fuente: Autores

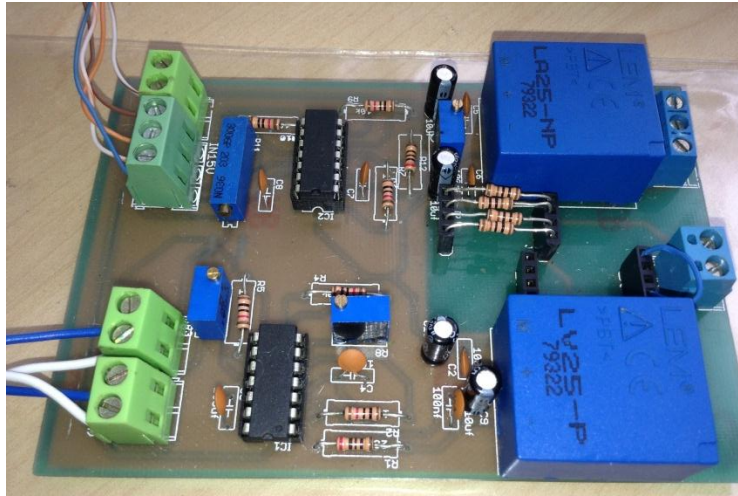
Cabe mencionar también que dentro de la etapa de ganancia de ambos sensores existe una resistencia variable tipo *trimmer* para la calibración del offset, para asegurar una mejor medida. La implementación final de la tarjeta de sensores se puede observar en la Figura 21.

B Caracterización del panel solar

Para diferentes condiciones de irradiancia y de temperatura en el generador fotovoltaico, se presentan diferentes valores de tensión y corriente, lo cual varía el punto de máxima potencia del mismo de acuerdo a una relación no lineal de estas variables. Generalmente es posible conocer estos valores dentro de la información de la hoja de datos que provee el fabricante.

Para el caso específico del generador utilizado en el desarrollo del proyecto, se contaba únicamente con sus valores nominales pero no fue posible conocer los puntos de máxima potencia para otros niveles de irradiancia diferentes al nominal (1000 W/m^2). Por esta razón, se tomó la iniciativa de caracterizar el panel y obtener las curvas de potencia con respecto a la tensión. La caracterización fue realizada variando una carga resistiva conectada al panel y midiendo los valores de tensión y corriente ante irradiancia y temperatura relativamente constanteS.

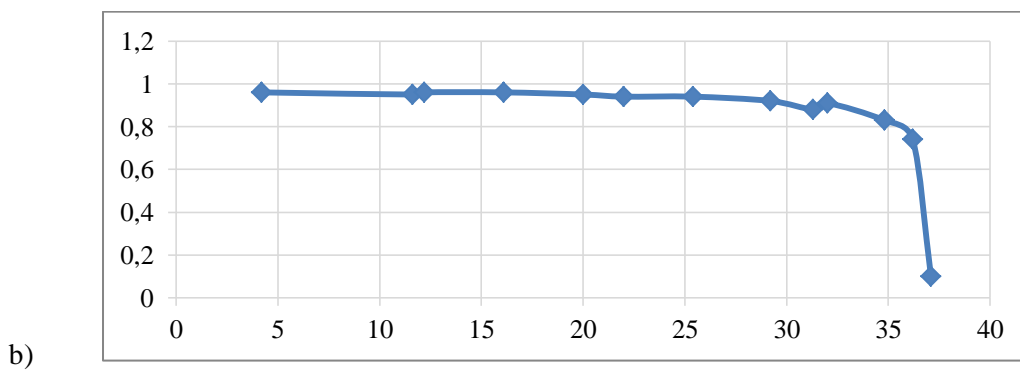
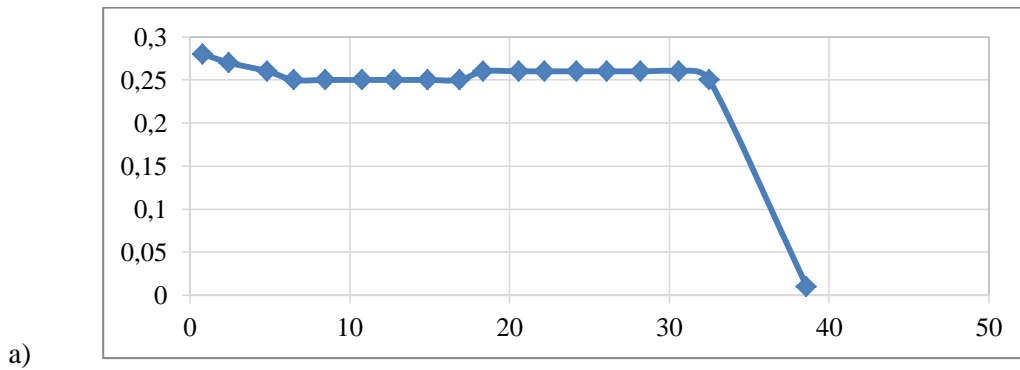
Figura 21. Diseño de circuito impreso de sensores

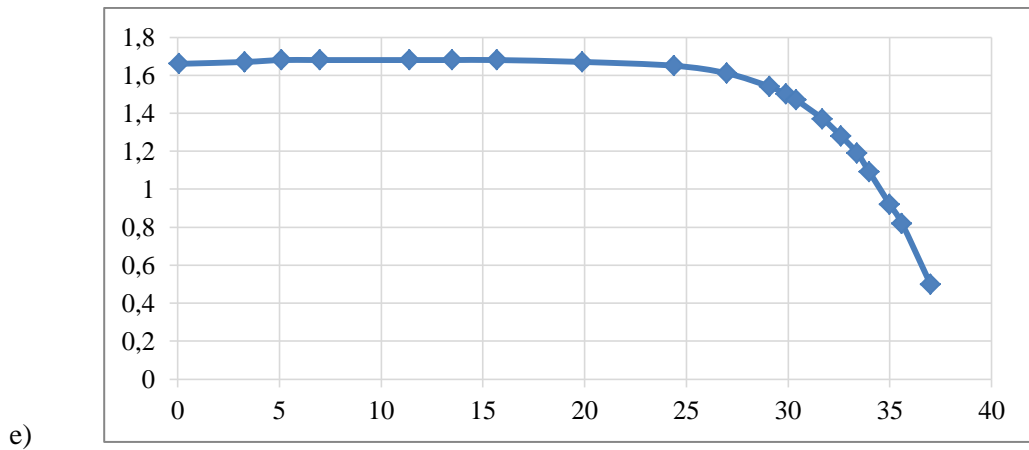
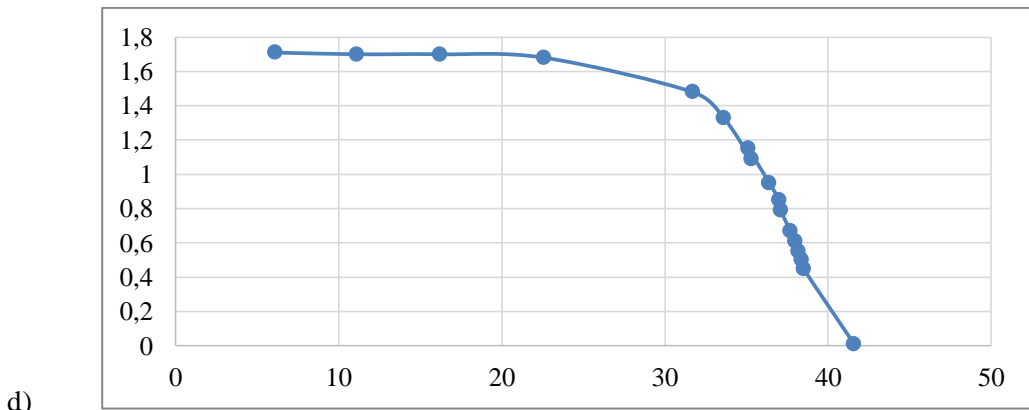
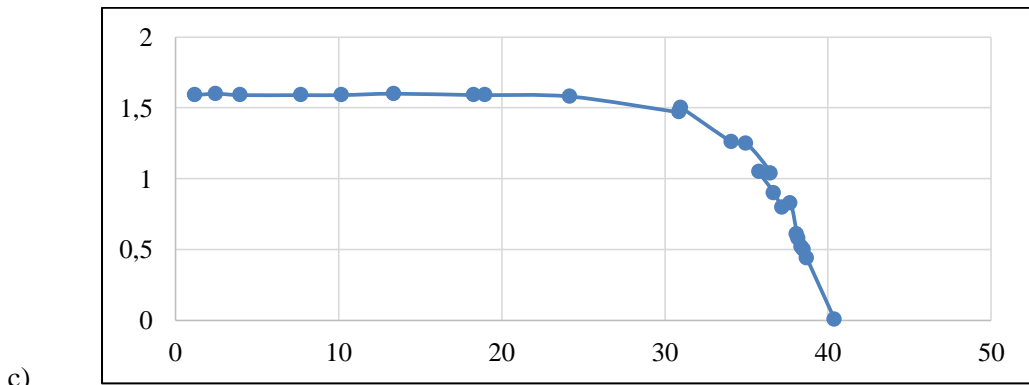


Fuente: Autores

En las gráficas mostradas en la Figura 22, se pueden observar los resultados de la caracterización del generador fotovoltaico para diferentes niveles de irradiancia y, de igual manera, se obtuvo el punto de máxima potencia en cada caso. Los valores de tensión (eje horizontal) se encuentran en voltios y los de corriente (eje vertical) se encuentran en amperios.

Figura 22. Gráficas de I-V del panel para distintos niveles de irradiancia. a) 150 W/m² b) 585 W/m² c) 840 W/m² d) 890 W/m² e) 970 W/m²





Fuente: Autores

A partir de la caracterización realizada, se comprobó que algunos de los datos de placa del generador fotovoltaico no correspondían a los arrojados por la caracterización, como la tensión de circuito abierto (V_{oc}) que presenta un valor cercano a 40 V. Esto permitió tener simulaciones más precisas y una aproximación más real del modelo de panel utilizado.