

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS

**JOSÉ JULIÁN CHACÓN AVENDAÑO
REYNALDO ANDRÉS ORTIZ JURADO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
PANELES FOTOVOLTAICOS**

**JOSÉ JULIÁN CHACÓN AVENDAÑO
REYNALDO ANDRÉS ORTIZ JURADO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director

MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO

Ingeniera Electricista, PhD

Codirector

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Ingeniera Electrónica, PhD

Codirector

JOHN EDINSON ARCHILA VALDERRAMA

Ingeniero Electrónico, MS.c

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

2016

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. PANELES FOTOVOLTAICOS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS | 18 |
| 2. CONVERTIDOR DC/DC SEPIC | 20 |
| 2.1 ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR DC/DC SEPIC | 20 |
| 2.2 OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC PARA CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES | 23 |
| 3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO | 26 |
| 3.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR DC/DC SEPIC | 26 |
| 3.2 DRIVER DEL CONVERTIDOR. | 32 |
| 3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL PROTOTIPO. | 38 |
| 3.4 SENSORES DE TENSIÓN Y CORRIENTE | 40 |
| 3.5 ALGORITMO DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE CONMUTACIÓN (PWM) Y ADQUISICIÓN DE DATOS | 41 |
| 4. RESULTADOS SIMULACIÓN | 46 |
| 5. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES | 53 |
| 6. OBSERVACIONES | 64 |
| 7. CONCLUSIONES | 65 |

| | |
|----------------------|----|
| CITAS BIBLIOGRAFICAS | 66 |
| BIBLIOGRAFÍA | 68 |
| ANEXOS | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Curva característica I-V con irradiancia constante para diferentes temperaturas. | 19 |
| Figura 2. Curva característica I-V con temperatura constante para diferentes valores de irradiancia. | 19 |
| Figura 3. Topología convertidor DC/DC SEPIC | 20 |
| Figura 4. Convertidor SEPIC en modo de conducción continua con Q1 encendido (arriba) y Q1 apagado (abajo). | 21 |
| Figura 5. Característica I-V para convertidores buck-boost. | 24 |
| Figura 6. Esquema Prototipo. | 26 |
| Figura 7. Topología convertidor DC/DC SEPIC para el prototipo | 27 |
| Figura 8. Señal PWM | 32 |
| Figura 9. Driver SKYPER 32R (SEMIKRON). | 34 |
| Figura 10. Tarjeta Board 1 Skyper 32 (Semikron). | 34 |
| Figura 11. Señal (a) en azul y señal (b) en rojo. Tiempo de subida. | 35 |
| Figura 12. Señal (a) en azul y señal (b) en rojo. Tiempo de bajada. | 36 |
| Figura 13. Señal (b) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de subida. | 36 |
| Figura 14. Señal (b) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de bajada | 37 |
| Figura 15. Señal (a) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de subida. | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Señal (a) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de bajada | 38 |
| Figura 17. Conexión Driver – IGBT. | 38 |
| Figura 18. Topología Fuente regulada. | 39 |
| Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo PWM, recolección y envío de datos. | 42 |
| Figura 20. Diagrama de flujo algoritmo de adquisición en PYTHON. | 44 |
| Figura 21. Esquema de simulación para el prototipo. | 46 |
| Figura 22. Parámetros de simulación del panel solar. | 47 |
| Figura 23. Parámetros de simulación para el IGBT. | 48 |
| Figura 24. Característica I vs V panel KYOCERA a 250 [w/m ²] y 25[°C]. | 49 |
| Figura 25. Característica P vs V panel KYOCERA a 250 [w/m ²] y 25[°C]. | 50 |
| Figura 26. Característica I vs V panel KYOCERA a 800 [w/m ²] y 25[°C]. | 50 |
| Figura 27. Característica P vs V del panel KYOCERA simulación a 800 [w/m ²] y 25[°C]. | 51 |
| Figura 28. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación a 25[°C], 250 [w/m ²] (azul) y 800 [w/m ²] (rojo). | 51 |
| Figura 29. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación a 25[°C], 250 [w/m ²] (azul) y 800 [w/m ²] (rojo) | 52 |
| Figura 30. Prototipo experimental implementado. | 53 |
| Figura 31. Característica I vs V y P vs V del panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 250 [w/m ²] y 30[°C]. | 54 |
| Figura 32. Característica I vs V y P vs V panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 838 [w/m ²] y 30[°C]. | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 33. Característica I vs V y P vs V panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 1023 [w/m ²] y 33[°C]. | 55 |
| Figura 34. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 838 [w/m ²]. | 56 |
| Figura 35. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 838 [w/m ²]. | 57 |
| Figura 36. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 250 [w/m ²]. | 57 |
| Figura 37. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 250 [w/m ²]. | 58 |
| Figura 38. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [56,18°C] e irradiancia de 838 [w/m ²]. | 60 |
| Figura 39. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [56,18°C] e irradiancia de 838 [w/m ²]. | 61 |
| Figura 40. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [37,81°C] e irradiancia de 250 [w/m ²]. | 61 |
| Figura 41. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [37,81°C] e irradiancia de 250 [w/m ²]. | 62 |

Figura 42. Característica I vs V y P vs V del panel SP50M obtenida experimentalmente a 814 [w/m²] y 30[°C].

63

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Componentes Convertidor DC/DC | 32 |
| Tabla 2. Componentes PCB HCPL3120 | 33 |
| Tabla 3. Componentes de la Fuente de Alimentación Regulada | 40 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Anexo A. Pcb optoacoplador hcpl3120. | 70 |
| Anexo B. Fuente de alimentacion. | 71 |
| Anexo C. Tarjeta de sensado. | 72 |
| Anexo D. Programa arduino PWM variable. | 73 |
| Anexo E. Instructivo instalación y ejecución software prototipo. | 86 |

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS*.

AUTORES: JOSÉ JULIÁN CHACÓN AVENDAÑO, REYNALDO ANDRÉS ORTIZ JURADO**.

PALABRAS CLAVE: Panel fotovoltaico, curvas características, convertidor DC/DC.

DESCRIPCIÓN:

Con la creciente implementación de los sistemas fotovoltaicos por ser una solución para zonas aisladas y una forma menos contaminante de generación de energía a comparación de las fuentes tradicionales tanto para el hogar como para las empresas, se hace necesario conocer el funcionamiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos según la zona geográfica de su instalación, buscando realizar diseños eléctricos confiables y eficientes. Los fabricantes de los paneles fotovoltaicos presentan en la hoja de datos las características eléctricas de estos en determinadas condiciones de irradiancia y temperatura. Sin embargo, es claro que las condiciones meteorológicas no son constantes en la geografía del planeta, lo que puede generar una incertidumbre al instalar un panel fotovoltaico en la zona de interés. Para lo anterior, en este proyecto de grado se implementa un prototipo que permite caracterizar los paneles fotovoltaicos mediante la obtención de las curvas de corriente vs tensión (I-V) y potencia vs tensión (P-V), según los niveles de irradiancia y temperatura a los cuales se encuentra expuesto el panel.

En este trabajo se emplea una metodología basada en un convertidor DC/DC tipo SEPIC, que emula una resistencia variable a la salida del panel. El convertidor es controlado mediante un algoritmo que realiza un barrido del ciclo de trabajo del convertidor, y mediante sensores de corriente y tensión, se obtienen el conjunto de valores de las señales de salida del panel (tensiones y corrientes) necesarios para realizar la caracterización. Estos valores son enviados a un computador, donde se realiza su almacenamiento y se visualizan las curvas características en tiempo real.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Mónica Andrea Botero Londoño, PhD.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A PROTOTYPE FOR THE CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS*.

AUTHORS: JOSÉ JULIÁN CHACÓN AVENDAÑO, REYNALDO ANDRÉS ORTIZ JURADO**.

KEY WORDS: Photovoltaic panel, characteristics curves, DC / DC converter.

DESCRIPTION:

Nowadays, photovoltaic systems are a solution for feeding isolated areas and reducing the contamination due to traditional energy sources. In this way, it is necessary to know the performance of the photovoltaic panels according to the geographical area where they are installed, in order to do a reliable and efficient design and implementation. Manufacturers of photovoltaic panels present in the data sheet the electrical characteristics of the panels under certain conditions of irradiance and temperature. However, it is clear that weather conditions are not constant in the geography of the planet, which can generate uncertainties in the characteristic curves of the panels according to the place of the installation. For this, this project considers the implementation of a prototype used to characterize photovoltaic panels. The prototype obtains the characteristic curves of current vs. voltage (IV) and power vs. voltage (PV) of the panel according to the levels of irradiance and temperature in the panel.

This paper presents a methodology based on a DC/DC converter in the topology SEPIC, which emulates a variable resistance in the output of the photovoltaic panel. An algorithm controls the converter. This algorithm sweeps the duty cycle of the converter and measures the output current and voltage of the panel by using sensors. The set of values (voltage and current) are sent to a computer in order to display in real-time the characterization curves. These values are also stored in a text file in the computer.

* Degree work.

** Physico-mechanical Engineering Faculty, School of Electrical Engineering. Supervisor: Mónica Andrea Botero Londoño, PhD.

INTRODUCCIÓN

Las energías basadas en combustibles fósiles presentan diferentes dificultades, ya sea porque se están agotando o por el grado de contaminación que producen[1]. Lo anterior ha llevado a buscar medios de generación basados en energías renovables, que mitiguen el impacto negativo ocasionado al planeta y sean viables para su utilización.

La energía solar ha ganado un espacio importante en las energías renovables principalmente por su fuente inagotable, el Sol, y su capacidad de generación. La utilización de paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica a partir de la energía solar es una de las principales alternativas que ofrece la energía solar.

Los paneles solares se basan en el efecto fotovoltaico; en pocas palabras cuando la radiación solar interacciona con la unión de materiales semiconductores se genera energía eléctrica. Las principales características de un panel fotovoltaico, corriente vs. tensión y potencia vs. tensión, son presentadas por el fabricante en la hoja de datos del panel[2]. Estos valores de tensión, corriente y potencia son determinados en condiciones de irradiancia y temperatura específicos, parámetros que no son constantes, varían según la ubicación geográfica, es decir, si varía la irradiancia y la temperatura, el panel fotovoltaico puede no presentar la misma curva característica que se presenta en la hoja de datos.

La obtención experimental de las curvas características se puede lograr por medio de resistencias variables[3], cargas capacitivas, cargas electrónicas variables de elevado costo y convertidores DC/DC[4].

En este trabajo se presenta la construcción de un prototipo que permite caracterizar automáticamente paneles fotovoltaicos para diferentes niveles de irradiancia y temperatura. El prototipo implementado se basa en un convertidor

DC/DC controlado para emular una resistencia variable a la salida del panel. El prototipo determina los datos correspondientes a la tensión y corriente de salida del panel, las cuales son enviadas a un computador por comunicación serial, en donde finalmente se almacenan los datos y se realizan y visualizan las curvas características.

Partiendo de lo anterior la presente tesis está compuesta por las siguientes secciones. En la sección II se exponen las características eléctricas en paneles fotovoltaicos, identificando como cambia la corriente y la tensión en función de la irradiancia y la temperatura. En la sección III se analiza el convertidor SEPIC y se resalta su utilidad en la caracterización de curvas de paneles fotovoltaicos. En la sección IV se dimensionan los dispositivos del convertidor SEPIC, y se describe el hardware implementado, el cual consiste de: un convertidor DC-DC, circuito de disparo, fuente de alimentación, circuito de sensado y sistema de control. Además se describe el software desarrollado para la programación del microcontrolador y la visualización de las curvas características de los paneles. En las secciones V y VI se exponen los resultados de simulación e implementación. Finalmente se presentan las observaciones y conclusiones del trabajo realizado. Adicionalmente, se incluye la sección de anexos, la cual presenta esquemáticos, programas y una guía de manejo de la interfaz.

1. PANELES FOTOVOLTAICOS Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que usan materiales semiconductores como el silicio. En su funcionamiento absorben fotones de una fuente de luz excitando electrones los cuales producen una corriente eléctrica si se le conecta una carga. La conexión serie-paralelo de las celdas forman los paneles fotovoltaicos [5].

En la caracterización básica de los paneles es muy común observar que las medidas eléctricas más relevantes son: la corriente y la tensión generada, de las cuales se pueden obtener las curvas I-V y P-V (ver figura 1), obteniendo parámetros muy importantes como: la corriente de corto circuito (ISC), la tensión de circuito abierto (VOC), la tensión a máxima potencia (VMP), la corriente a máxima potencia (IMP), el factor de forma (FF) y la eficiencia (η) [6]. Las curvas características de los paneles y estos parámetros varían según las condiciones meteorológicas, la orientación, la inclinación y la ubicación geográfica. Un ejemplo de esta variación se observa en las figuras 1 y 2 para diferentes valores de temperatura e irradiancia uniformes en el panel.

Figura 1. Curva característica I-V con irradiancia constante para diferentes temperaturas.

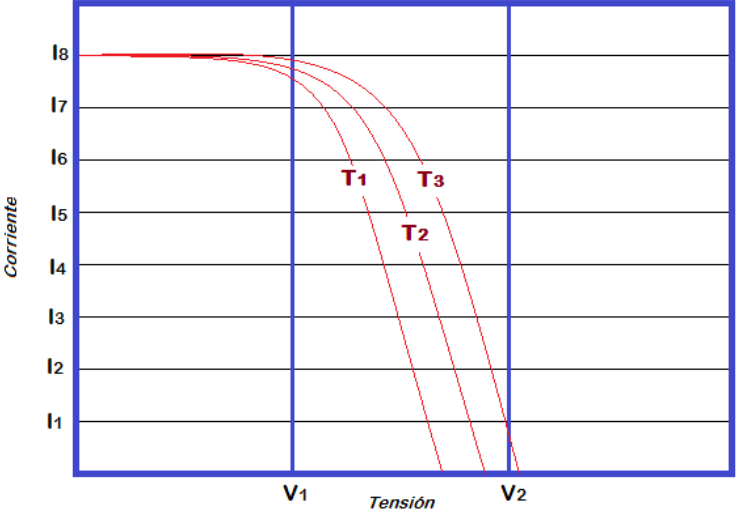
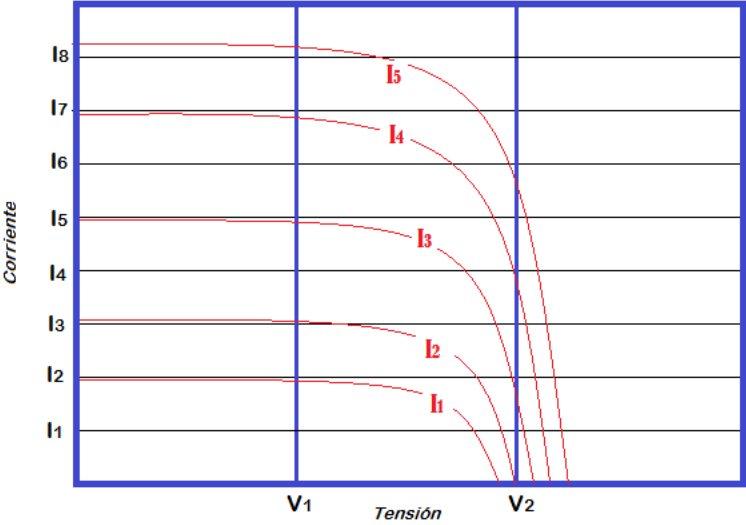


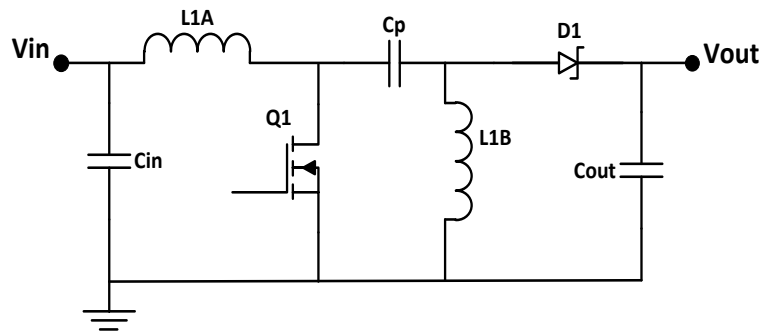
Figura 2. Curva característica I-V con temperatura constante para diferentes valores de irradiancia.



2. CONVERTIDOR DC/DC SEPIC

El convertidor DC/DC SEPIC (*Single Ended Primary Inductor Converter*) es una topología que proporciona una tensión de salida no invertida, ya sea mayor o menor que la tensión de entrada. Esta conversión es muy utilizada en fuentes de alimentación no reguladas.

Figura 3. Topología convertidor DC/DC SEPIC

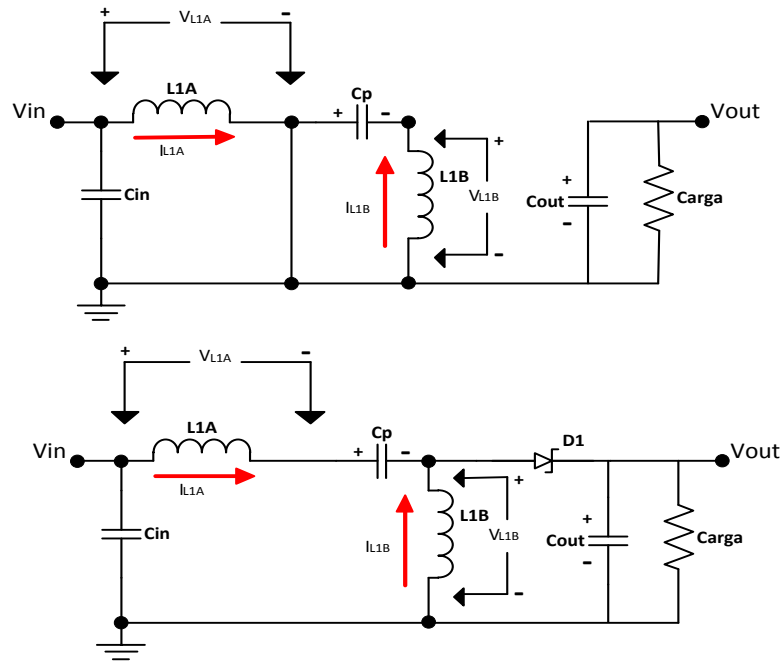


2.1 ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR DC/DC SEPIC

A continuación se explica el funcionamiento del SEPIC como convertidor suponiendo su operación en régimen permanente y modo de conducción continuo (CCM).

El convertidor opera con un periodo de conmutación T_s , en el cual el interruptor Q_1 se encuentra cerrado durante el intervalo $0 \leq t < DT_s$ (Modo 1) y abierto durante $DT_s \leq t < T_s$ (Modo 2). En la figura 4 se observa los dos modos de operación del convertidor SEPIC. A continuación se realiza el análisis requerido para expresar el ciclo de trabajo en función de la tensión de entrada y salida basado en [7].

Figura 4. Convertidor SEPIC en modo de conducción continua con Q1 encendido (arriba) y Q1 apagado (abajo).



(1) Realizando sumatoria de tensiones alrededor del lazo exterior del circuito de la figura 3 se obtiene:

$$-V_{in} + V_{L1A} + V_{Cp} - V_{L1B} = 0$$

(2) Suponiendo que la tensión promedio en el inductor es cero [7]:

$$-V_{Cp} - +0 + V_{Cp} - 0 = 0 \quad (2)$$

(3) La tensión promedio a través del capacitor C_p es:

$$V_{Cp} = V_{in} \quad (3)$$

(4) Suponiendo elementos de conmutación ideales (transistor y diodo) [7]: Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está apagado, por lo tanto; la tensión a través de L_{1A} para el modo 1 es:

$$V_{L1A} = V_{in} \quad (4)$$

(5) En el modo de conducción 2, al realizar la sumatoria de tensiones se obtiene:

$$-V_{in} + V_{L1A} + V_{Cp} + V_{out} = 0 \quad (5)$$

(6) Asumiendo que la tensión a través de C_p permanece constante y su valor promedio es V_{in} (ecuación (3)):

$$-V_{in} + V_{L1A} + V_{in} + V_{out} = 0 \quad (6)$$

(7) Se obtiene:

$$V_{L1A} = -V_{out} \quad (7)$$

(8) Para el modo 2, la tensión promedio a través del inductor es cero por la suposición de que éste opera en estado estable [7] De las ecuaciones (4) y (7) se obtiene:

$$(V_{L1A_{Modo1}}) * (DTs) + (V_{L1A_{Modo2}}) * (1 - D)Ts = 0 \quad (8)$$

(9)

$$V_{in}(DTs) - V_{out} (1 - D)Ts = 0 \quad (9)$$

(10) La tensión de salida en función de la tensión de entrada y del ciclo de trabajo resulta:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{D}{1-D} \quad (10)$$

(11) A su vez, el ciclo de trabajo puede ser expresado como:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out}+V_{in}} \quad (11)$$

2.2 OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/DC PARA CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES

En este trabajo el convertidor SEPIC es utilizado para obtener las curvas características del panel fotovoltaico. Para el diseño del convertidor se ajusta la topología con el fin de lograr emular una resistencia variable a la salida del panel, mediante un barrido en su ciclo de trabajo. Para cada punto de operación según el barrido realizado, se toman los valores de tensión y corriente a la entrada del panel con el fin de lograr obtener las curvas características.

Hoy en día la utilización de convertidores DC-DC en la caracterización de celdas y paneles fotovoltaicos [9] tiene la ventaja que aunque los convertidores son de tipo analógico, éstos pueden ser controlados fácilmente por dispositivos digitales como micro controladores, lo cual permite realizar pruebas experimentales en la celda y establecer un rango de operación que se pueda programar desde un computador personal.

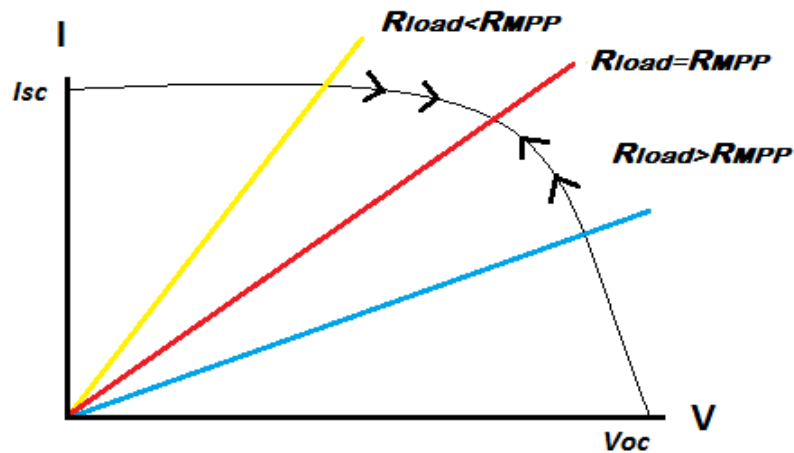
La relación de transformación del convertidor depende de su ciclo de trabajo y frecuencia de conmutación. Esta relación se puede controlar utilizando la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse With Modulation*) en la cual se varía el ciclo de trabajo del convertidor, el cual corresponde a la relación entre el

tiempo en estado de conducción del interruptor de potencia y el periodo de conmutación.

El manejo de estos convertidores para caracterizar paneles, se hace gracias a que éste se puede utilizar como una impedancia variable dependiente de su resistencia de carga y su ciclo de trabajo.[8]–[10]

Existen diferentes topologías de convertidores para la caracterización de los paneles. Entre estas topologías, los buck-boost (elevador-reductor) son los más adecuados para este tipo de aplicaciones, ya que permiten hacer un barrido completo de la curva característica (ver Figura 5). Como se observa en esta figura, el barrido para un convertidor buck-boost permite moverse en corriente y tensión, antes y después del punto de máxima potencia del panel

Figura 5. Característica I-V para convertidores buck-boost.



Las dos topologías de convertidor buck-boost más apropiadas para esta aplicación son la CUK y SEPIC[4], por tener una corriente de entrada no pulsante lo cual hace que existan menos efectos de ruido y oscilaciones en la entrada del panel, por lo que las curvas características obtenidas son más confiables.

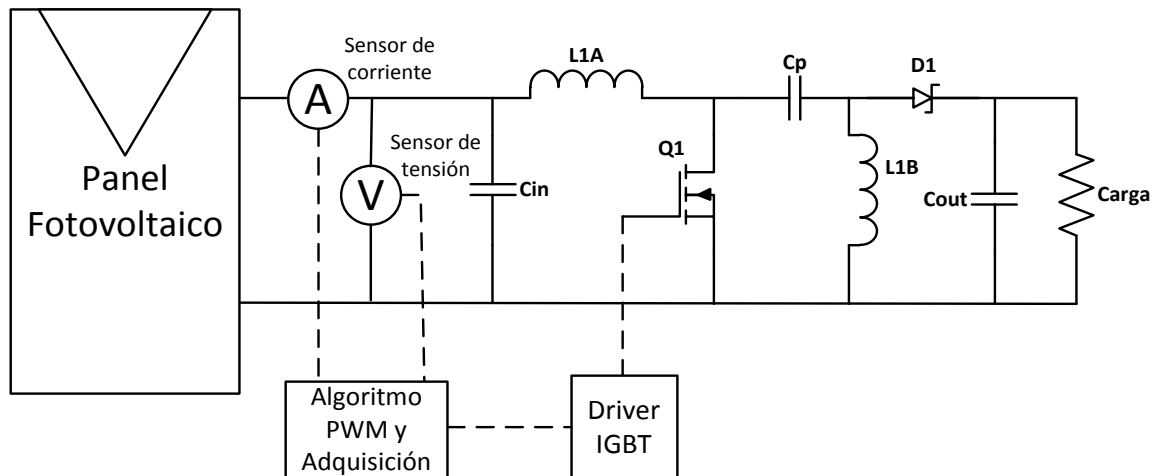
Estas dos topologías presentan eficiencias muy similares y en términos analíticos son casi idénticos. Su diferencia radica en el condensador de enlace de tensión que en la topología SEPIC es pequeño en comparación con el CUK, lo cual da una ventaja en costo al SEPIC.

El convertidor SEPIC presenta un rango de eficiencia bastante amplio. Es importante que el diseño sea apropiado para que el convertidor opere en modo continuo, ya que si no opera de esta manera, puede afectar la respuesta del convertidor como emulador.

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO

El prototipo implementado cuenta con 5 etapas: Un convertidor DC/DC SEPIC, driver del convertidor DC/DC, etapa de alimentación del prototipo, sensado de tensión y corriente finalmente la etapa de control y adquisición de datos. A continuación se presenta un esquema del prototipo y posteriormente se analiza cada una de las etapas.

Figura 6. Esquema Prototipo.



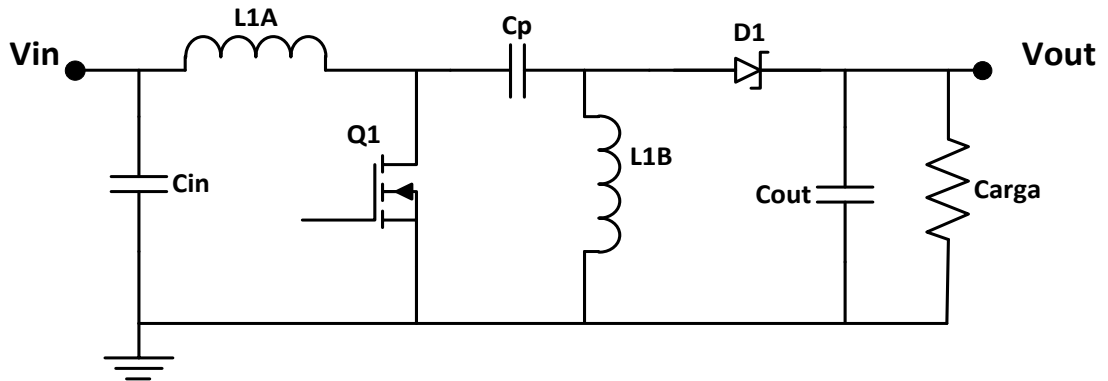
3.1 DISEÑO DEL CONVERTIDOR DC/DC SEPIC

Según el método elegido para la caracterización de los paneles fotovoltaicos y los requerimientos del sistema a implementar, se debe diseñar un convertidor DC/DC elevador-reductor SEPIC, para emular una resistencia variable.

En la Figura 7 se muestra la topología del convertidor DC/DC SEPIC, compuesto por un condensador a la entrada (C_{in}), dos inductores (L_{1A} y L_{1B}), un transistor

encargado de realizar la conmutación del circuito, un condensador de acople (C_p) seguido de un diodo de potencia (D_1); a la salida del convertidor se tiene un condensador (C_{out}) y se agrega al circuito típico una carga.

Figura 7. Topología convertidor DC/DC SEPIC para el prototipo



Como el convertidor va a emular una resistencia variable a medida que su ciclo de trabajo varía; el ciclo de trabajo se toma como una variable conocida. Para el prototipo propuesto se realiza el barrido del ciclo de trabajo entre el 20% y el 94%. La tensión y la corriente de entrada al convertidor, son la tensión y la corriente de salida del panel fotovoltaico[11]. De esta manera y teniendo en cuenta cierto margen de protección para asegurar el funcionamiento del prototipo en condiciones extremas de irradiancia y temperatura; se considera que las variables de tensión y corriente de entrada al convertidor pueden variar entre 5V a 50V y entre 0A-10A, respectivamente.

El dimensionamiento de los elementos fue basado en [12]–[14], a continuación se presenta su procedimiento:

Con la ecuación (11) se puede conocer la tensión (V_{out}) y corriente (I_{out}) de salida del convertidor, a partir del ciclo de trabajo (D), tensión (V_{in}), corriente (I_{in}) de entrada del SEPIC, y considerando la tensión en el diodo D1 (V_{fwd}).

$$\frac{D}{1-D} = \frac{V_{out} + V_{fwd}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} \quad (11)$$

Se considera el límite mayor de la tensión y de la corriente de entrada, un ciclo de trabajo del 50% para realizar el diseño inicial, así mismo se supone la tensión del diodo en 0.5 V. De la realización de la ecuación (12) se obtiene la tensión y corriente de salida:

$$\frac{V_{out} + 0.5}{50} = \frac{13}{I_{out}} \quad (12)$$

$$V_{out} = 49.5[V].$$

$$I_{out} = 10[A].$$

Un aspecto importante en el diseño del convertidor es el rizo en la corriente del inductor. Un nivel alto aumenta la interferencia electromagnética (EMI) y un nivel bajo genera un comportamiento inestable del sistema, se recomienda usar entre el 20% y 40% de ondulación[12], para este diseño se realizarán cálculos con un 30% de ondulación en el inductor.

Mediante la ecuaciones (13) y (14) se obtiene la variación de corriente en las bobinas ΔI_L . Para este cálculo se tiene en cuenta la ondulación en la corriente del inductor y la eficiencia (η) del convertidor (se considera una eficiencia del 90%). Además, se considera la operación del circuito para bajos niveles de irradiación

y/o paneles solares de baja potencia en donde la corriente de entrada al convertidor presenta valores bajos y se presenta el límite crítico para los valores de la inductancia. En este sentido, se toma un valor de corriente promedio mínimo por la bobinas de 0.5 [A].

$$\Delta I_L = 30\% * \frac{I_{in}}{\eta} \quad (13)$$

$$\Delta I_L = 30\% * \frac{0.5}{0.9} = 0.1667 [A] \quad (14)$$

El circuito del convertidor DC/DC presenta dos inductores. La ecuación (15) permite calcular el valor mínimo de los inductores a una frecuencia de conmutación (f_{sw}) de 20 [KHz] ciclo de trabajo de trabajo (D) de 0.5, (ΔI_L) corresponde al rizo pico a pico de la corriente en la bobina.

$$L_{1A} = L_{1B} = L_{min} = \frac{V_{in} * D}{\Delta I_L * f_{sw}} \quad (15)$$

$$L_{1A} = L_{1B} = \frac{50 * 0.5}{0.1667 * 20000} = 0.0075 = 7.5 [mH] \quad (16)$$

Partiendo de lo anterior, se selecciona un valor de 10 [mH] para las bobinas. La ecuación (17) permite calcular el rizo pico a pico resultante por las bobinas.

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} * D}{L * f_{sw}} = \frac{50 * 0.5}{0.01 * 20000} = 0.125 [A] \quad (17)$$

A partir del valor máximo de corriente promedio por las bobinas y el valor del rizo pico a pico, mediante la ecuación (18) se calcula el valor pico de corriente en el inductor L_{1A} .

$$I_{L_{1A}(pico)} = \frac{I_{in}}{\eta} + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{10}{.9} + \frac{0.125}{2} = 11.174[A] \quad (18)$$

La corriente pico en el inductor L_{1B} se puede expresar mediante la siguiente expresión basado en [14]:

$$iL_{1B} = 10 * \left(1 + \frac{30\%}{2}\right) = 10 * 1.15 = 11.5[A] \quad (19)$$

El condensador de salida C_{out} se calcula mediante la ecuación (20).

$$C_{out} \geq \frac{I_{out} * D}{\Delta V_{rpl} * f_{sw}} \quad (20)$$

Donde ΔV_{rpl} es la variación o rizado en la tensión del condensador. Según los requerimientos del sistema se opta por un valor de 0,5[V].

$$C_{out} \geq \frac{10 * 0.5}{0.5 * 20000} = 500[\mu F] \quad (21)$$

Como la resistencia de salida considerada no es un elemento del circuito típico del convertidor DC/DC SEPIC, pero debido a la aplicación que se dio al convertidor es necesaria su implementación para el desarrollo del prototipo; mediante el software de simulación PSIM se simuló el convertidor y se obtuvo un valor para la resistencia de carga entre 40 y 60 [Ω].

El transistor de potencia Q_1 encargado de realizar la conmutación del convertidor se elige según la tensión y corriente que debe soportar.

La ecuación (22) describe la corriente pico que debe soportar el transistor [14], la cual corresponde a la suma de las corrientes a través de las inductancias

$$I_{Q1(pico)} = I_{L_{1A}(pico)} + I_{L_{1B}(pico)} \quad (22)$$

$$I_{Q1(pico)} = 11.174 + 11.5 = 22.674 \quad (23)$$

La tensión máxima que debe soportar el transistor es de $V_{in}+V_{out}$. Este valor es evaluado mediante simulaciones en PSIM, dando como resultado un valor máximo de aproximadamente 120 [V] para un panel KYOCERA KD240GH-2PB de 240[W]. Sin embargo, teóricamente este valor es de 834 [V] para una tensión de entrada máxima de 50 [V] y un ciclo de trabajo máximo de 0.94.

El diodo D_1 debe soportar la misma tensión del transistor y debe ser capaz de disipar:

$$P_{D1} = I_{out} * V_{fwd} = 10 * 0.5 = 5[w] \quad (24)$$

Como protección al circuito se implementan dos diodos de potencia en paralelo, los cuales conforman el diodo D_1 .

Teniendo en cuenta el diseño realizado, se eligen diferentes dispositivos electrónicos que cumplen las exigencias del circuito. En la tabla 1 se presentan los componentes del convertidor DC/DC SEPIC.

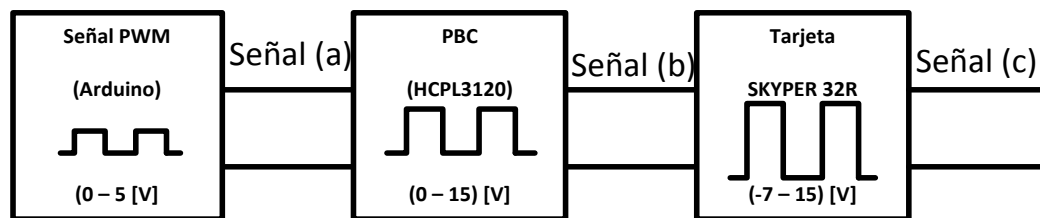
Tabla 1. Componentes Convertidor DC/DC

| Elemento | Valor o Referencia |
|------------------------|-------------------------|
| Condensador de entrada | 2200[μ F] / 450[V] |
| Inductor 1 | 10[mH] / 10[A] |
| Transistor IGBT | Semikron SKM50GB12D |
| Condensador de acople | 2200[μ F] / 500[V] |
| Inductor 2 | 10[mH] / 10[A] |
| 2 Diodos Schottky | 650[V] / 15[A] cada uno |
| Condensador de salida | 560[μ F] / 400[V] |
| Resistencia de carga | 48[Ω] / 330[W] |

3.2 DRIVER DEL CONVERTIDOR.

Con el fin de adecuar los niveles de tensión y corriente de la señal de conmutación del IGBT y aislar galvánicamente las señales de control y de potencia, en este trabajo se utilizan dos etapas, tal como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Señal PWM



La señal PWM de control generada por un Arduino Mega, pasa a través de dos tarjetas que acondicionan la señal que llega a la puerta del IGBT.

La primera etapa corresponde a una tarjeta de adecuación, diseñada e implementada mediante un optoacoplador HCPL3120. Esta tarjeta permite

adecuar la señal de salida de control a niveles entre 0 a 15[V]. El diseño de los circuitos impresos utilizados en el prototipo se realizó con el software especializado KICAD de código abierto. El esquemático y la captura de la PCB se presentan en el Anexo 1 y en la tabla 2 se observan los elementos utilizados.

Tabla 2. Componentes PCB HCPL3120

| Elemento | Cantidad | Valor o Referencia |
|----------------------|----------|---------------------------|
| Conector | 2 | Dos vías marca Phoenix |
| Optoacoplador | 1 | HCPL3120 |
| Condensador cerámico | 1 | 100[nF] |
| Trimer lineal | 1 | 1[K Ω] ref. 3006p |
| Resistencia | 1 | 100[Ω] / 0.5 [W] |

La segunda etapa está compuesta por un “driver” de SEMIKRON, el cual permite adecuar los niveles de tensión de la señal de conmutación entre -7 y 15 [V] y además aísla galvánicamente la parte de control y la parte de potencia del circuito. Emplear el driver es una recomendación del fabricante. Además de las anteriores características, el driver ayuda con la disminución de ruido[15].

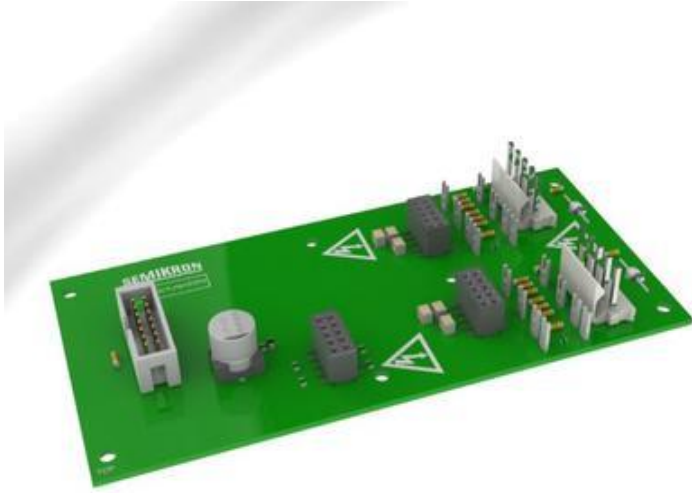
SEMIKRON maneja diferentes driver para sus IGBT. Teniendo en cuenta la aplicación del prototipo se optó por elegir el driver SKYPER 32R (Figura 9) y la tarjeta BOARD 1 SKYPER 32R (Figura 10) que funciona como un adaptador para el driver.

Figura 9. Driver SKYPER 32R (SEMIKRON).



Fuente: [16]

Figura 10. Tarjeta Board 1 Skyper 32 (Semikron).



Fuente: [17]

A continuación se presentan mediciones con osciloscopio de la señal de control pasando por la tarjeta de adecuación y el driver de SEMIKRON, con el fin de analizar los retardos entre la señal a la salida del driver frente a la señal de control.

La señal generada por el Arduino se denota como señal(a), la señal que sale de la tarjeta del Optoacoplador HCPL3120 es la señal (b) y por último la señal que entra al IGBT es la señal (c).

En las figuras 11 y 12 se presentan las señales (a) en color azul y (b) color rojo, con una escala de tiempo de 1[μ s]. Se observa que los tiempos de respuesta de la tarjeta de adecuación con respecto a la señal generada por el Arduino son menores a 0.5 μ s (tiempos de subida y de bajada) y su magnitud es la esperada.

Figura 11. Señal (a) en azul y señal (b) en rojo. Tiempo de subida.

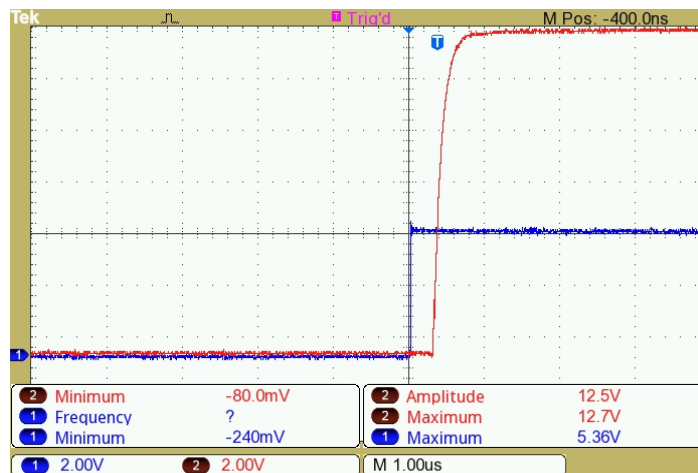
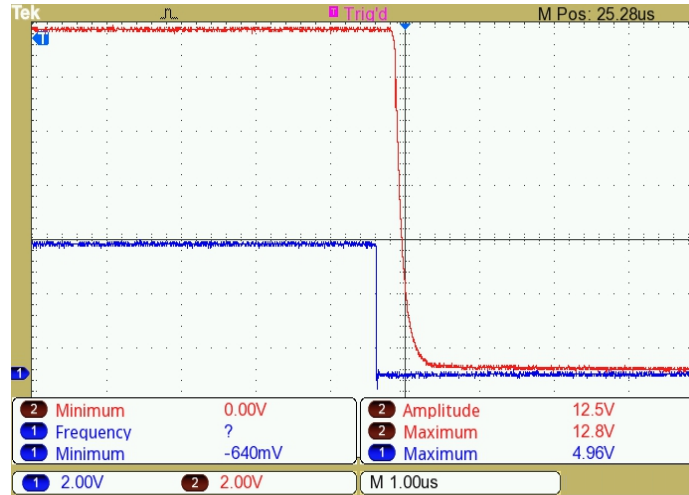


Figura 12. Señal (a) en azul y señal (b) en rojo. Tiempo de bajada.



Siguiendo el trayecto de la señal PWM en las figuras 13 y 14, se presentan la señal (b) en azul y la señal que sale del driver SKYPER 32R en color rojo. Se corrobora que la señal en la puerta del IGBT toma valores de -7[V] y 15[V] como lo requiere este dispositivo, por lo tanto el driver le está entregando el nivel de tensión y corriente necesarios para su funcionamiento. El tiempo de retardo entre las señales es de aproximadamente 1[μ s].

Figura 13. Señal (b) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de subida.

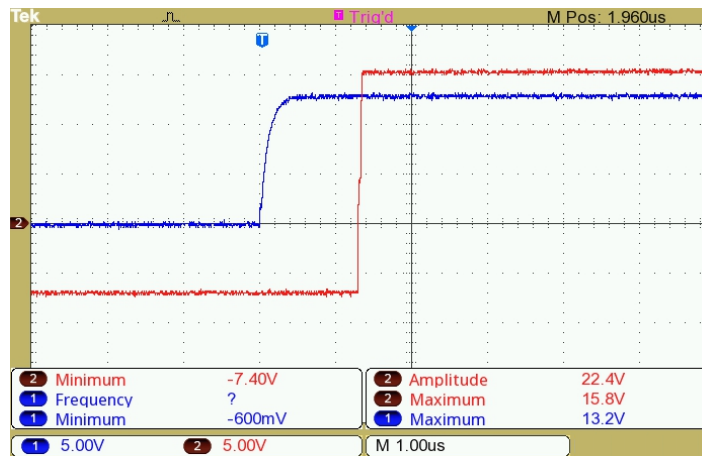
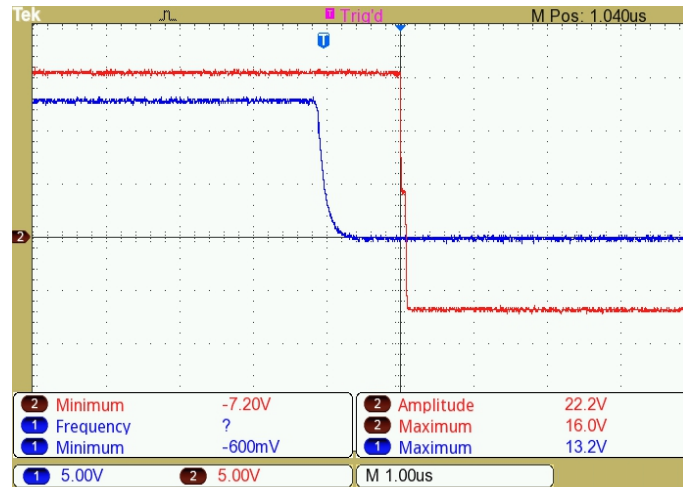


Figura 14. Señal (b) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de bajada



Por último se presenta el análisis de la señal de control (azul) frente a la señal de salida del driver (rojo), ver figura 15. En esta gráfica se observa el cambio en magnitud de la señal de conmutación y se aprecian los tiempos de respuesta de subida y bajada los cuales son inferiores a 2[μ s].

Figura 15. Señal (a) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de subida.

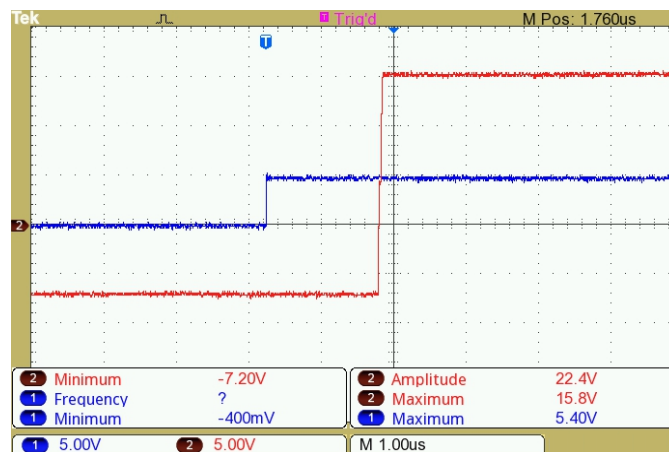
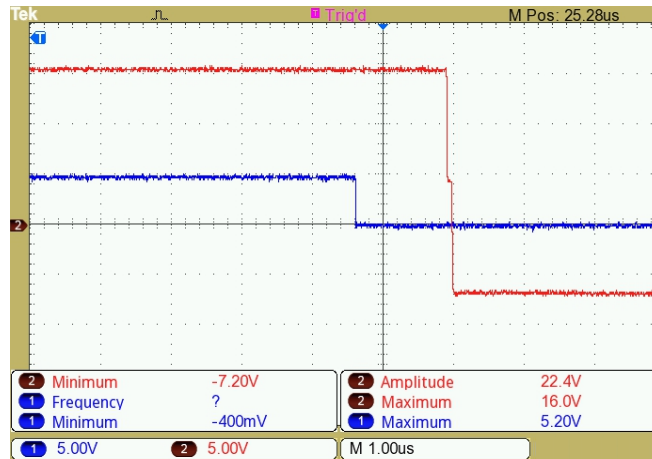
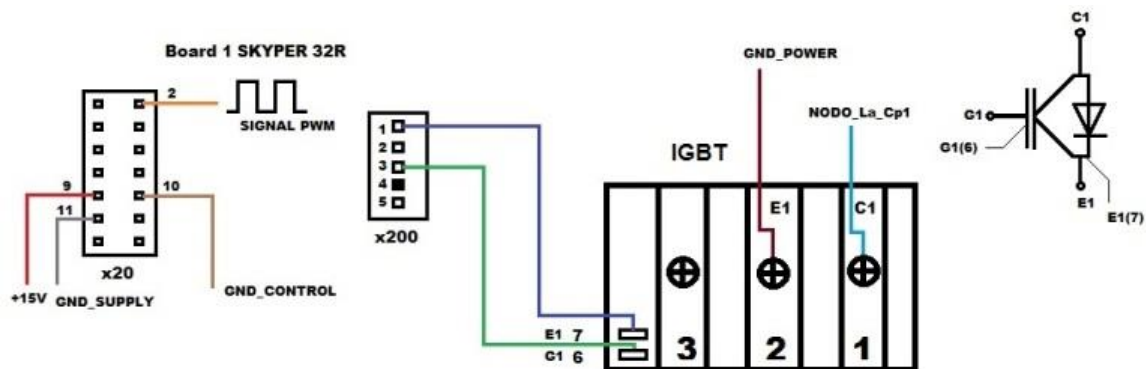


Figura 16. Señal (a) en azul y señal (c) en rojo. Tiempo de bajada



Como complemento para la sección del driver se muestra en la figura 17 la conexión eléctrica entre el driver SKYPER 32R y el IGBT SKM50GB12D.

Figura 17. Conexión Driver – IGBT.



3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.

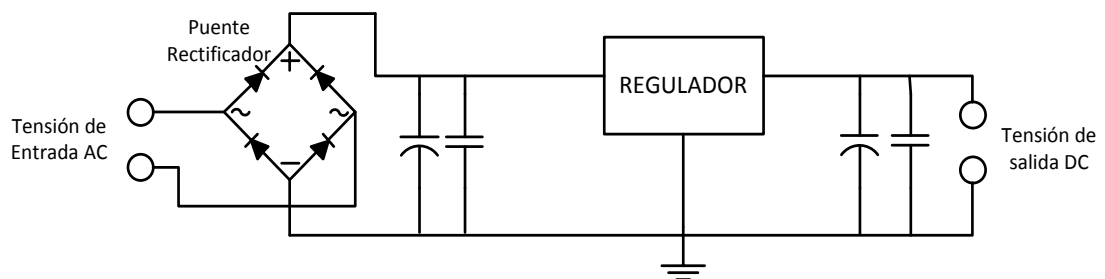
Diversos dispositivos electrónicos del prototipo necesitan una tensión de alimentación de corriente continua. Esta alimentación debe estar aislada de la tensión de la red eléctrica y del circuito de potencia del prototipo.

Se requiere alimentar el driver del IGBT (+15[V]) y los sensores de tensión y corriente (-15[V] y +15[V]) encargados de la medición de las características eléctricas del Panel Fotovoltaico.

Para obtener la alimentación deseada es necesario implementar una fuente regulada[18], es decir un dispositivo que toma energía de la red eléctrica y la suministra a una carga en forma estabilizada frente a diversas variaciones.

Se realiza el diseño de una fuente regulada típica la cual se presenta en la figura 18. Como la fuente entrega diferentes niveles de tensión se utiliza un transformador con tres salidas de +18[V]. Se implementan las 3 fuentes en la misma PCB, es decir, la fuente tiene salidas de: +15[V], -15[V] y +15[V].

Figura 18. Topología Fuente regulada.



Partiendo de la topología de la figura 18, se diseña la fuente deseada. Para dicho fin se utiliza el regulador LM7815 para tensiones positivas de 15[V]. Para la tensión de -15[V] se utiliza el regulador LM7915. Se seleccionan estos elementos por su disponibilidad y costo en el mercado, los cuales son apropiados y cumplen los requisitos para esta aplicación.

El esquemático de la fuente y la captura de la pcb se observan en el Anexo 2. Los componentes seleccionados se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Componentes de la Fuente de Alimentación Regulada

| Elemento | Cantidad | Valor Referencia |
|---------------------------|----------|------------------------|
| Conector | 6 | Dos vías marca Phoenix |
| Puente rectificador | 3 | 6 ^a |
| Condensador cerámico | 6 | 10[nF] |
| Condensador electrolítico | 3 | 2200[μF] / 50[V] |
| Condensador electrolítico | 3 | 10[μF] / 50 [V] |
| Regulador +15[V] | 2 | LM7815 |
| Regulador -15[V] | 1 | LM7915 |

3.4 SENSORES DE TENSION Y CORRIENTE

Para lograr el objetivo de obtener las curvas características de los paneles fotovoltaicos, se requiere tomar medidas de las señales de tensión y corriente a la salida del panel fotovoltaico, para cada punto de operación según el barrido realizado.

Para tal propósito, se utilizan dos sensores de tensión y corriente de referencias LV25[19] y LA25 de LEM [20], respectivamente. Estos sensores son ajustados para realizar mediciones de tensión de hasta 60V y de corriente de hasta 13[A]. Las señales de salida de los sensores son adecuadas a valores de tensión entre 0V y 5V, las cuales son medidas mediante el puerto Analógico/ Digital del Arduino.

En el Anexo 3 se presentan el esquemático de la etapa de sensado y la PCB de la tarjeta resultante.

3.5 ALGORITMO DE GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE CONMUTACIÓN (PWM) Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta sección se aborda la parte de generación de la señal PWM, la obtención de los datos obtenidos mediante la etapa de sensado y la realización de las curvas características.

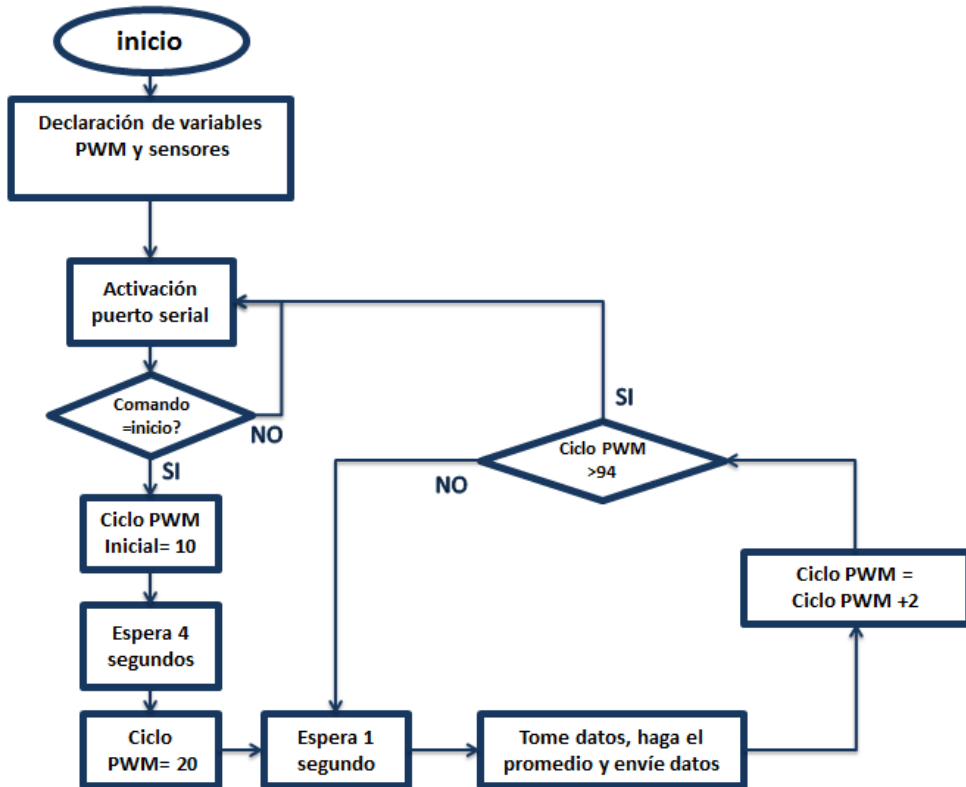
Para la generación de la señal PWM y la recolección de los datos de tensión y corriente, se utiliza el Arduino mega 2560. Este Arduino es una tarjeta basada en el atmega 2560. Cuenta con 54 pines de entrada/salida con un rango admisible de tensión entre 0 a 5 [V], de las cuales 15 se pueden usar como puertos PWM. Además tiene 16 entradas Analógicas/Digitales, 4 puertos UART, un oscilador de 16[MHz], una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio [21]. Se escoge esta tarjeta por su facilidad para activar y usar los puertos PWM, su utilidad en la recolección de datos y envío a un ordenador mediante su conexión serial y USB.

Para el manejo del Arduino se requiere la instalación del software de compilación. En este caso se utiliza el Arduino 16.0 arquitectura de 64 bits

En términos generales, el algoritmo implementado en el Arduino se encarga de generar una señal PWM (señal de conmutación) con un ciclo de trabajo específico. Posteriormente, mediante dos puertos Analógicos/Digitales se adquieren los datos provenientes de los sensores de tensión y corriente. Estos datos son finalmente enviados al ordenador por el puerto serial.

En la Figura 19 se presenta un esquema de la estructura del algoritmo utilizado para la generación de la señal PWM, recolección de datos y envío de datos al computador.

Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo PWM, recolección y envío de datos.



En primera instancia, el algoritmo contempla un comando de inicio para evitar su ejecución sin que el usuario establezca la orden.

El algoritmo inicializa la operación con un ciclo de trabajo del 10% y realiza una espera de 4 [s] para tomar las medidas de la etapa de sensado y enviar los datos al computador. Este tiempo es necesario para garantizar que el circuito haya alcanzado el régimen permanente al momento de tomar la medición.

Posteriormente, el ciclo de trabajo se cambia al 20% y después de 1 [s] se vuelven a tomar los valores de la etapa de sensado y se envían de nuevo los datos al computador.

Luego, el algoritmo inicia un proceso iterativo, aumentando el ciclo de trabajo en un 2% hasta un valor del 94%. En este proceso iterativo, los datos adquiridos de la etapa de sensado también son mandados al computador. La variación del 2% se hace para tener una mejor resolución en la gráfica final.

Vale la pena mencionar que en cada iteración se espera un tiempo de 1[s] para realizar las mediciones después de variar el ciclo de trabajo. Además, en cada iteración se toman 100 datos de los dos puertos Analógicos/Digitales y se realiza un promediado de estos datos. Los resultados del promediado son los enviados a través del puerto serial para ser leídos por el computador.

Para la adquisición de datos en el computador, se utiliza el software de código abierto PYTHON, software de programación con un entorno parecido al de c++ lo cual hace relativamente sencillo su manejo. Se utiliza este software porque ofrece la posibilidad de hacer un algoritmo para adquisición de datos de manera confiable y rápida permitiendo manipular los datos.

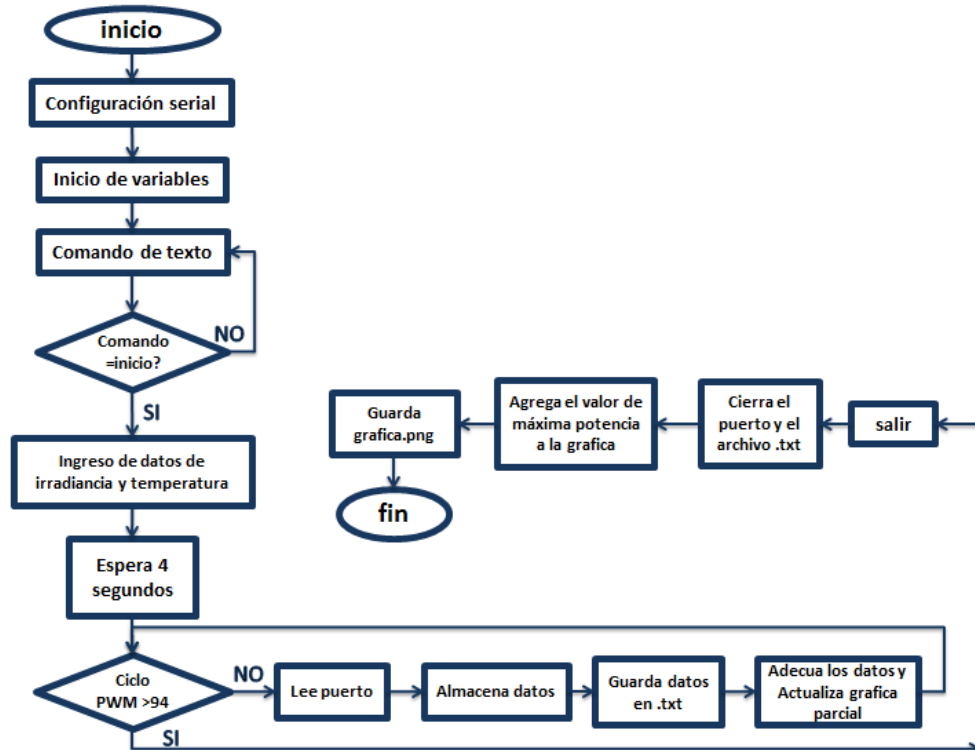
Este algoritmo de Python esta enlazado con el código en Arduino. De esta manera, cuando el usuario da la orden de inicio desde Python comienza a ejecutarse el código en el Arduino.

Inicialmente cuando se ejecuta el comando "inicio", Python configura el puerto serial, da inicio a las variables y pide al usuario los valores de irradiancia y temperatura a las cuales se encuentra expuesto el panel en el momento de realizar las medidas.

Al iniciar el proceso se lee el puerto serial, obteniendo los datos de tensión y corriente enviados por el Arduino, se realiza el producto de estos datos para hallar el valor de potencia y posteriormente se realizan parcialmente las curvas características (en tiempo real). Paulatinamente se guardan los datos en un archivo de texto y se actualiza la gráfica. Cuando se completa el barrido del ciclo de trabajo, se genera un comando de salida que termina el programa. En ese momento Python cierra el puerto, el archivo de texto y la gráfica parcial; además se generan las curvas características finales, mostrando la irradiancia, temperatura y potencia máxima del panel. La imagen es entregada en formato PNG.

El diagrama de la figura 20 muestra la lógica del algoritmo descrito para la adquisición.

Figura 20. Diagrama de flujo algoritmo de adquisición en PYTHON.



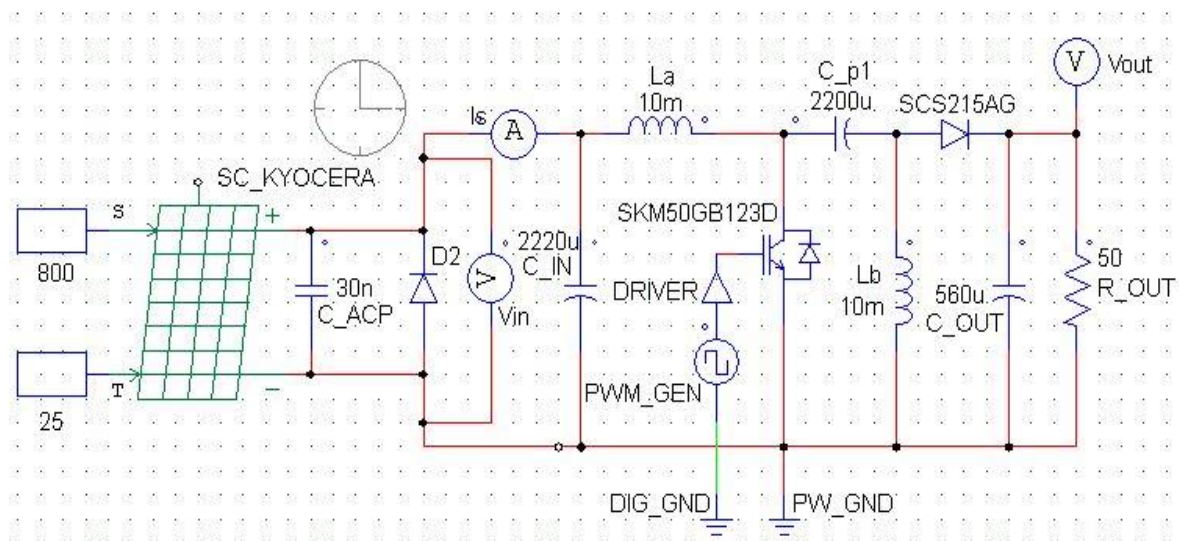
Los *scripts* utilizados en el Arduino y en PYTHON se muestran en el Anexo 4. En el Anexo 5 se puede apreciar un instructivo de la instalación y ejecución del software del prototipo.

4. RESULTADOS SIMULACIÓN

En esta sección se presenta el esquema de simulación realizado en el software de simulación de circuitos eléctricos PSIM y los resultados obtenidos en dicha simulación del convertidor SEPIC conectado a un panel solar variando su ciclo de trabajo.

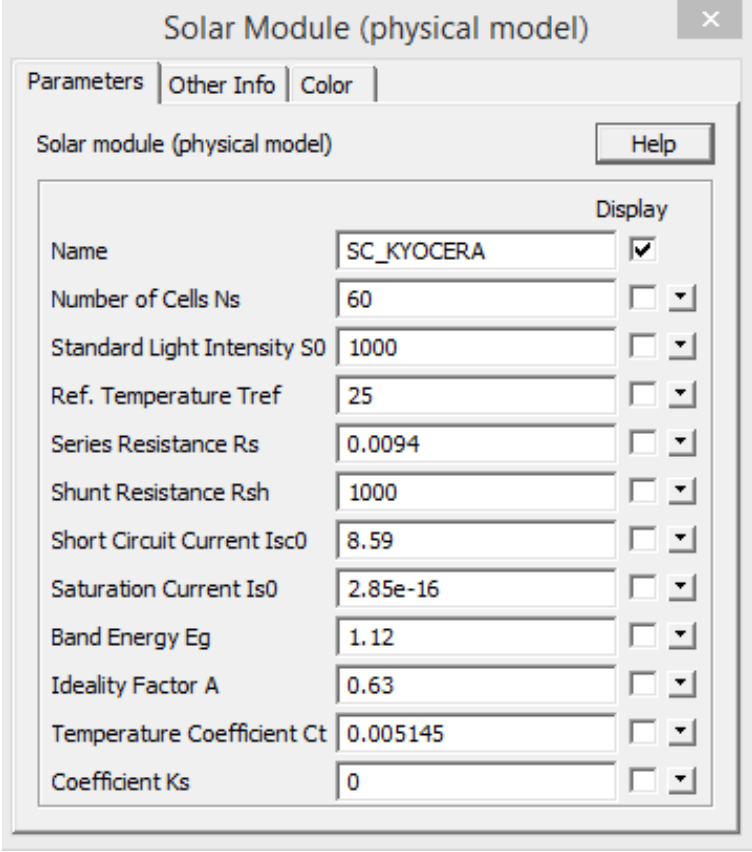
En la figura 21 se muestra la topología del convertidor con los parámetros obtenidos en diseño. El único valor que se toma en base a los resultados de simulación es el de la carga, debido a que el valor de la carga se adecua según el nivel de corriente que se necesita medir. Si la carga se encuentra en un rango superior implica una caída en la corriente.

Figura 21. Esquema de simulación para el prototipo.



Los parámetros para simular el panel en PSIM se observan en la figura 22. Algunos parámetros fueron tomados de la hoja de datos del panel solar KD240GH-2PB KYOCERA [11], otros se obtuvieron mediante cálculos matemáticos y una herramienta propia del software PSIM.

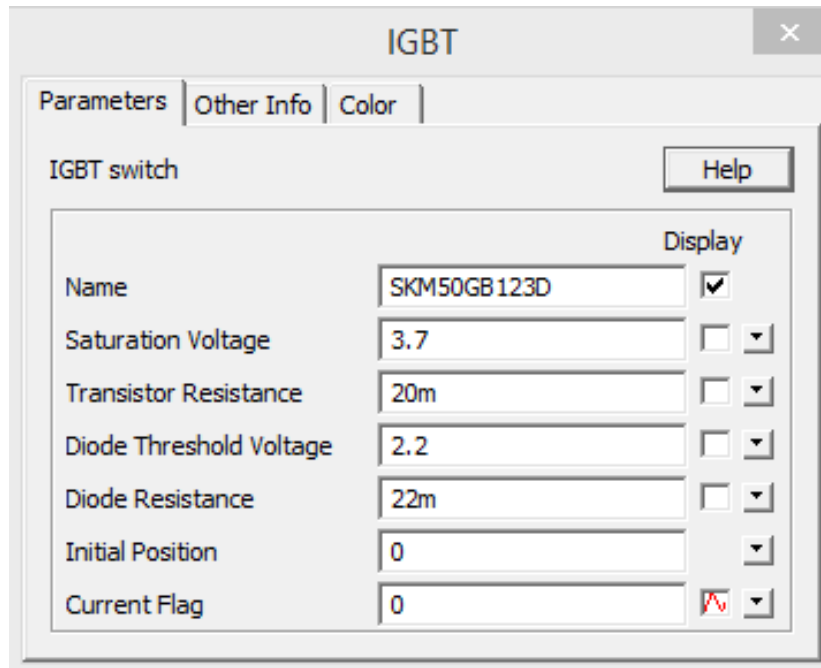
Figura 22. Parámetros de simulación del panel solar.



| Parameter | Value | Display |
|-----------------------------|------------|-------------------------------------|
| Name | SC_KYOCERA | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Number of Cells Ns | 60 | <input type="checkbox"/> |
| Standard Light Intensity S0 | 1000 | <input type="checkbox"/> |
| Ref. Temperature Tref | 25 | <input type="checkbox"/> |
| Series Resistance Rs | 0.0094 | <input type="checkbox"/> |
| Shunt Resistance Rsh | 1000 | <input type="checkbox"/> |
| Short Circuit Current Isc0 | 8.59 | <input type="checkbox"/> |
| Saturation Current Is0 | 2.85e-16 | <input type="checkbox"/> |
| Band Energy Eg | 1.12 | <input type="checkbox"/> |
| Ideality Factor A | 0.63 | <input type="checkbox"/> |
| Temperature Coefficient Ct | 0.005145 | <input type="checkbox"/> |
| Coefficient Ks | 0 | <input type="checkbox"/> |

El tipo de transistor seleccionado es un IGBT, Semikron SKM50GB12D cuyos parámetros para la simulación se obtuvieron de la hoja de datos [22] (ver figura 23).

Figura 23. Parámetros de simulación para el IGBT.



La simulación de la señal de conmutación (ver anexo) se realiza con un generador de onda cuadrada a una frecuencia de 20[kHz]. En esta simulación la temperatura y la irradiancia se asumen homogéneas en todo el panel.

Para simular la característica del panel se necesita hacer un barrido del ciclo de trabajo desde un valor cercano a 0% hasta un valor cercano al 100%, así el convertidor se comporta como una carga variable y exige todo el rango de tensiones y corrientes que puede generar el panel.

Haciendo el barrido se toman los datos de la tensión de entrada y salida; los valores promedio de estos datos se manipulan en el software Microsoft Excel y se procede a graficar esos resultados.

Las siguientes cuatro figuras muestran las características de I-V y P-V generadas con los datos anteriores. El valor de P se obtuvo haciendo el producto entre la tensión y la corriente. Las curvas características se hicieron para valores bajos y altos de irradiancia, a continuación se observa la simulación para 250[w/m²].

Figura 24. Característica I vs V panel KYOCERA a 250 [w/m²] y 25[°C].

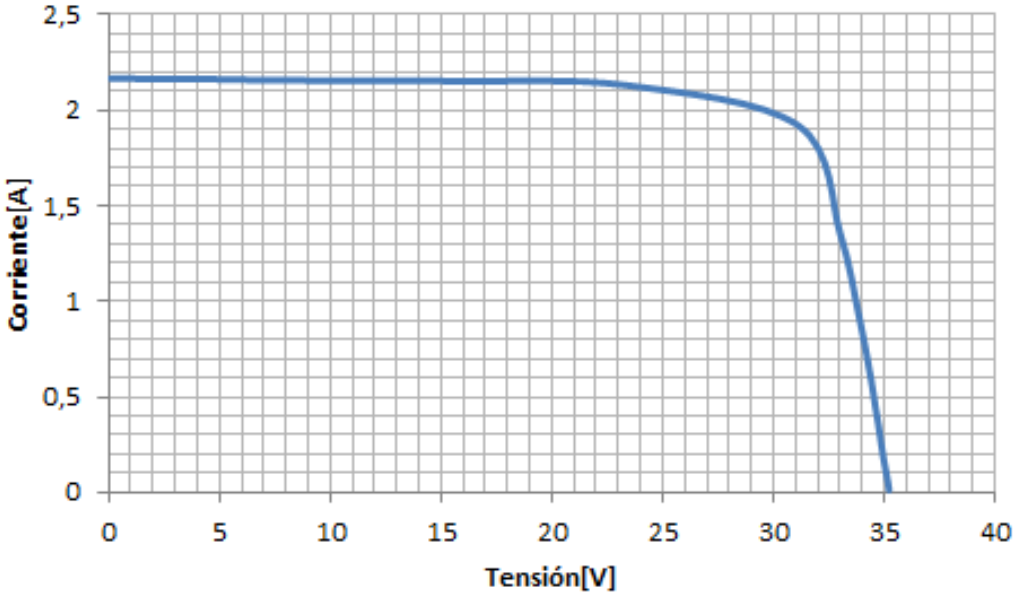
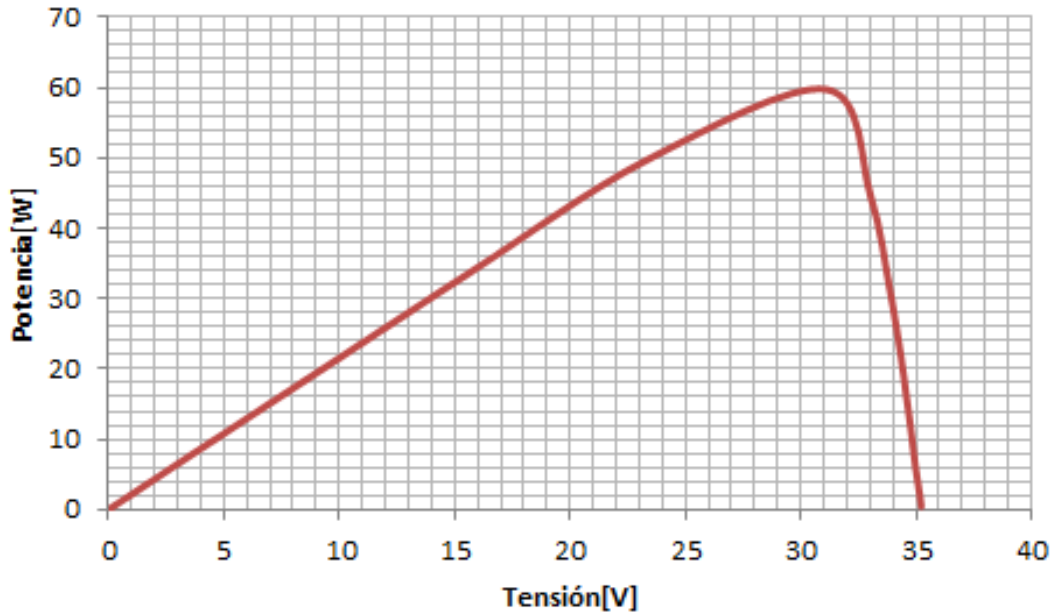


Figura 25. Característica P vs V panel KYOCERA a 250 [w/m²] y 25[°C].



En las figuras 26 y 27 se muestra la simulación del prototipo a una irradiancia de 800[w/m²].

Figura 26. Característica I vs V para el panel KYOCERA a 800 [w/m²] y 25[°C].

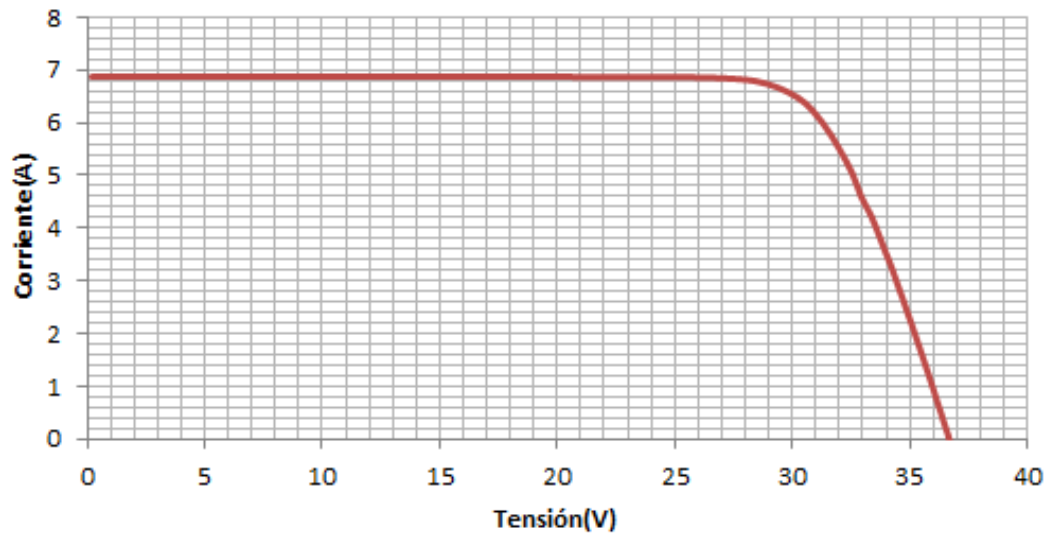


Figura 27. Característica P vs V panel KYOCERA simulada a 800 [w/m²] y 25[°C].

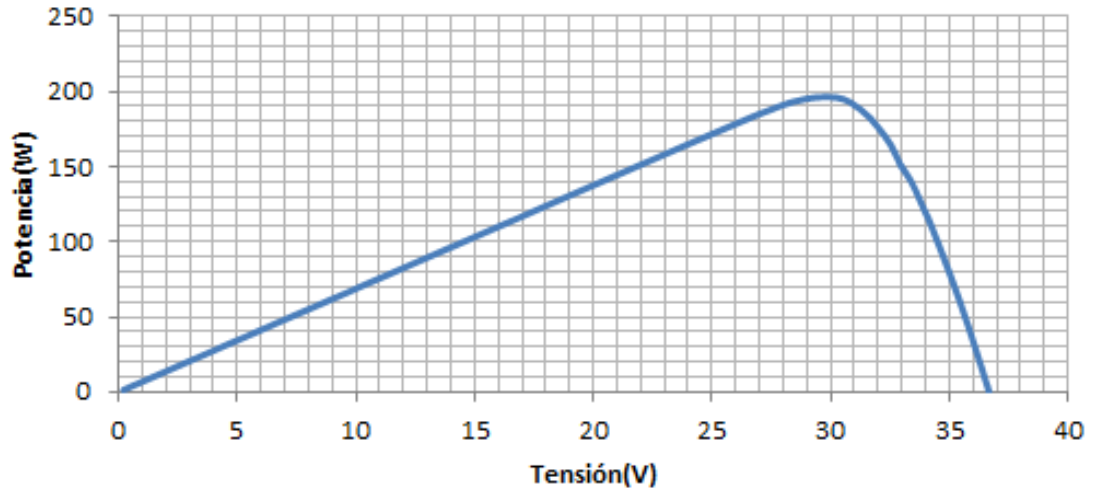


Figura 28. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación a 25[°C], 250 [w/m²] (azul) y 800 [w/m²] (rojo).

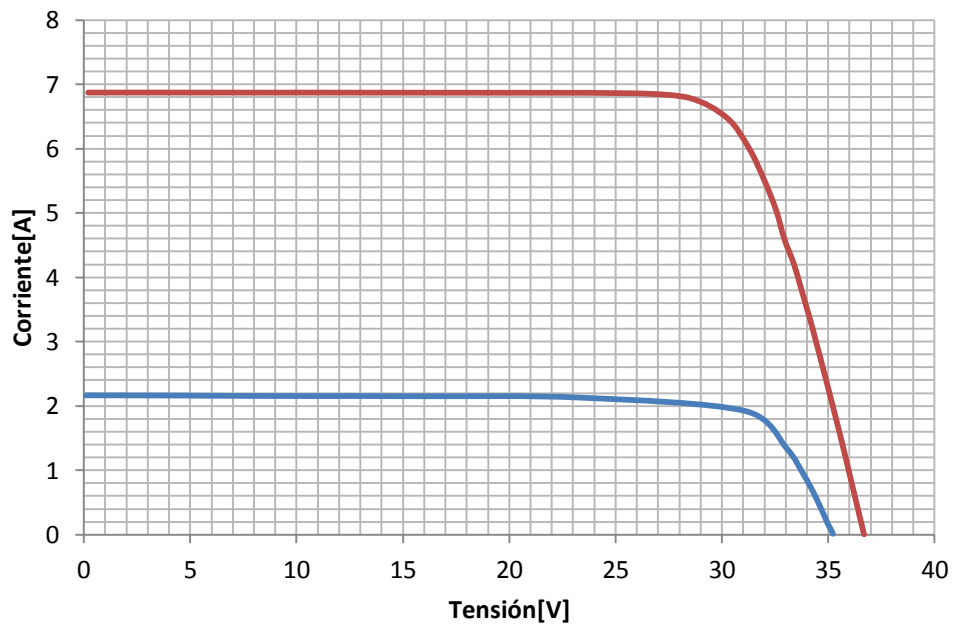
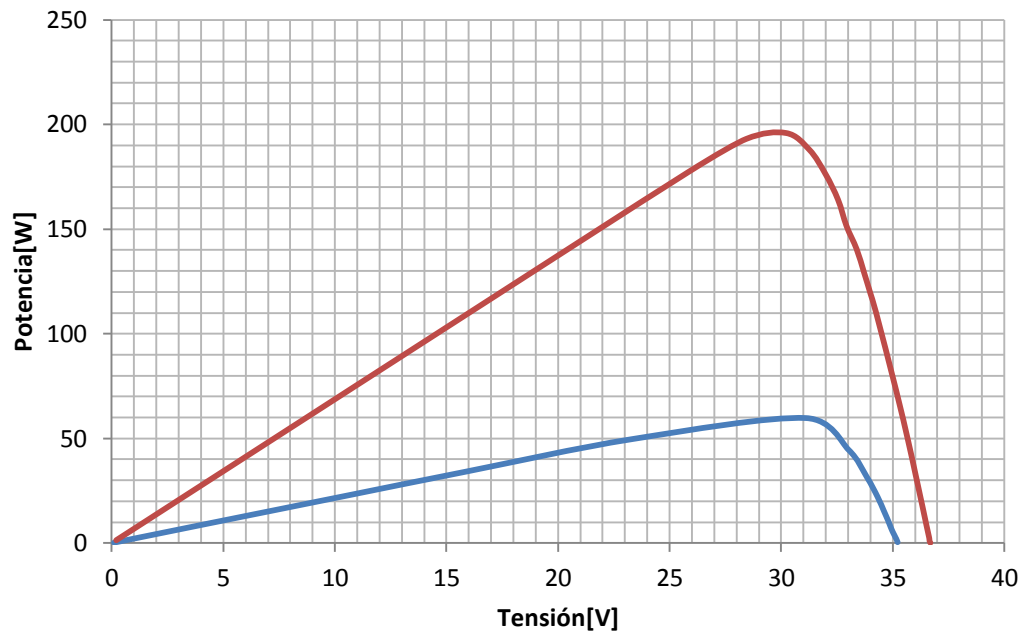


Figura 29. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación a 25[°C], 250 [w/m2] (azul) y 800 [w/m2] (rojo)



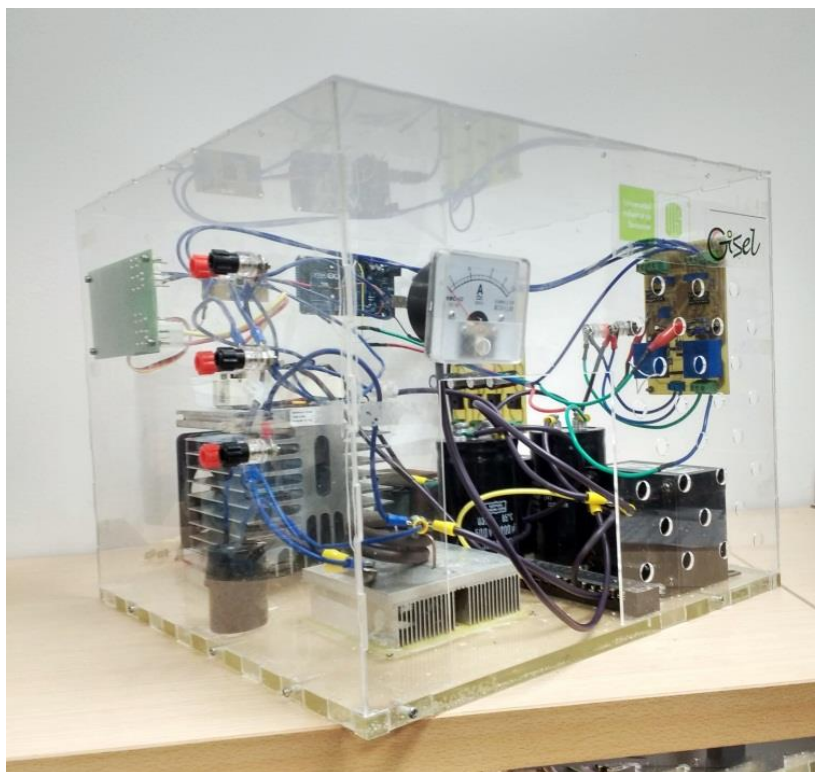
En las comparaciones anteriores se visualiza el cambio en los valores de las características alterando la irradiancia desde un valor estándar para fabricantes de celdas fotovoltaicas de 800W/m2 a un valor menor de irradiancia de 250[W/m2], con una temperatura de celda de 25[°C].

Tal como se observa, los resultados de simulación obtenidos muestran que la metodología planteada en esta tesis para la obtención de las curvas características es adecuada y logra los objetivos propuestos. Al realizar el barrido en el ciclo de trabajo del IGBT, el convertidor SEPIC lleva a que el panel fotovoltaico opere en todo el rango de tensiones y corrientes requeridas para realizar las curvas características.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 30 se presenta una fotografía del prototipo experimental implementado.

Figura 30. Prototipo experimental implementado.



A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del prototipo. Estas pruebas se realizaron a dos tipos de paneles solares reales, uno KYOCERA de referencia KD240GH-2PB de 240 Wp y el otro de referencia SP50M de 50 Wp, para diferentes niveles de irradiancia.

En las figura 31, 32 y 33 se presentan los resultados de las curvas características obtenidas experimentalmente, para el panel KYOCERA bajo niveles de irradiancia y temperatura de 250 [w/m²] y 30[°C]; 838 [w/m²] y 30[°C]; y 1023 [w/m²] y 33[°C], respectivamente.

Figura 31. Característica I vs V y P vs V del panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 250 [w/m²] y 30[°C].

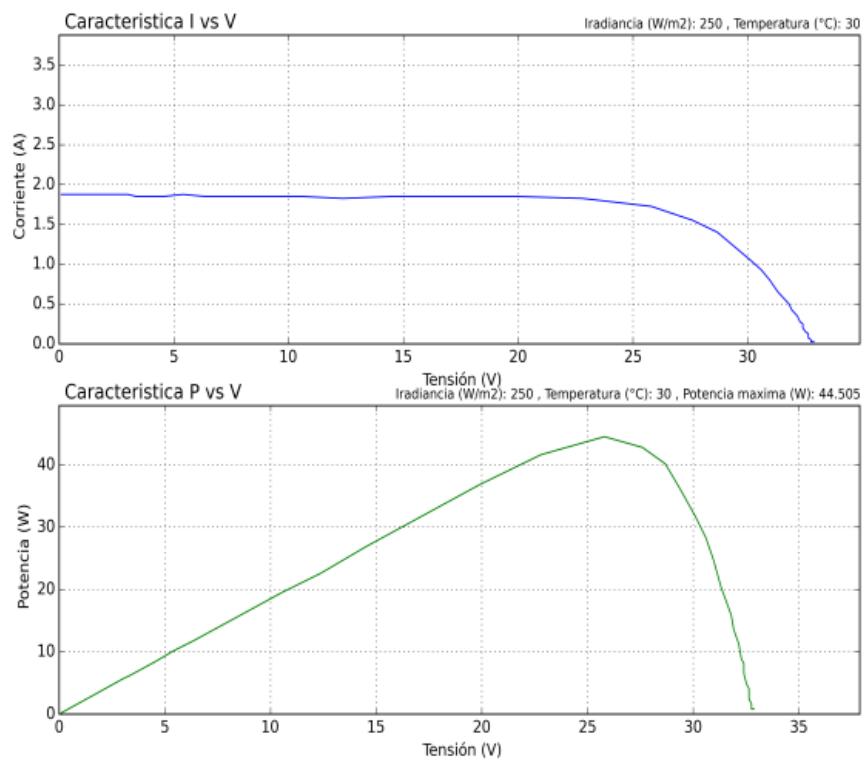


Figura 32. Característica I vs V y P vs V panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 838 [w/m²] y 30[°C].

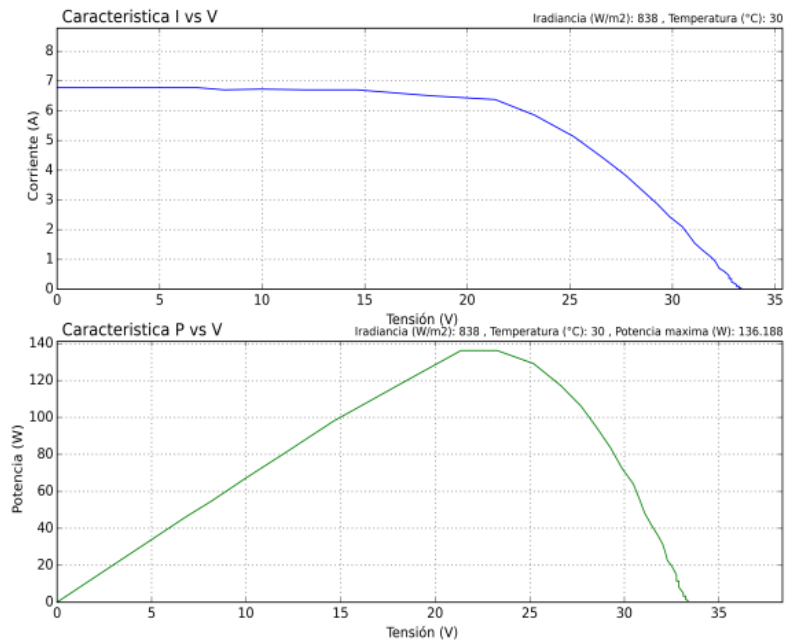
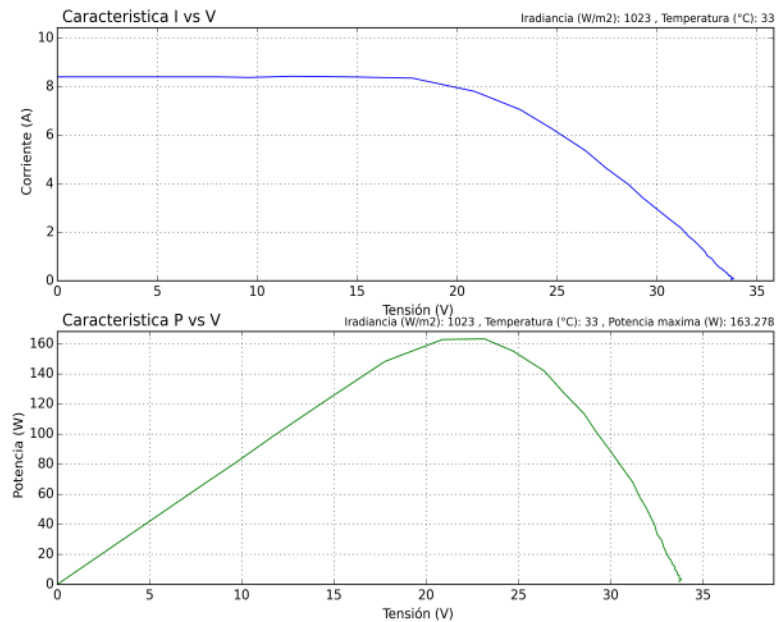


Figura 33. Característica I vs V y P vs V panel KYOCERA obtenida experimentalmente a 1023 [w/m²] y 33[°C].



De estas graficas se puede observar como varia significativamente la corriente con el cambio en la irradiancia. En la figura 31 se llega a una corriente de corto circuito cercana a los 2 [A] con irradiancia de 250[w/m²], mientras en la figura 33 se llega por encima de los 8[A] con una irradiancia de 1023[w/m²].

La tensión de circuito abierto a la salida del panel varía poco con el cambio de irradiancia y se mantiene en el rango entre 32 y 35[v], ya que la variación de temperatura es de solo 3°C.

En las figuras (34-37) se observan las comparaciones de las curvas características mediante simulación y las obtenidas experimentalmente a dos valores de irradiancia.

Figura 34. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 838 [w/m²].

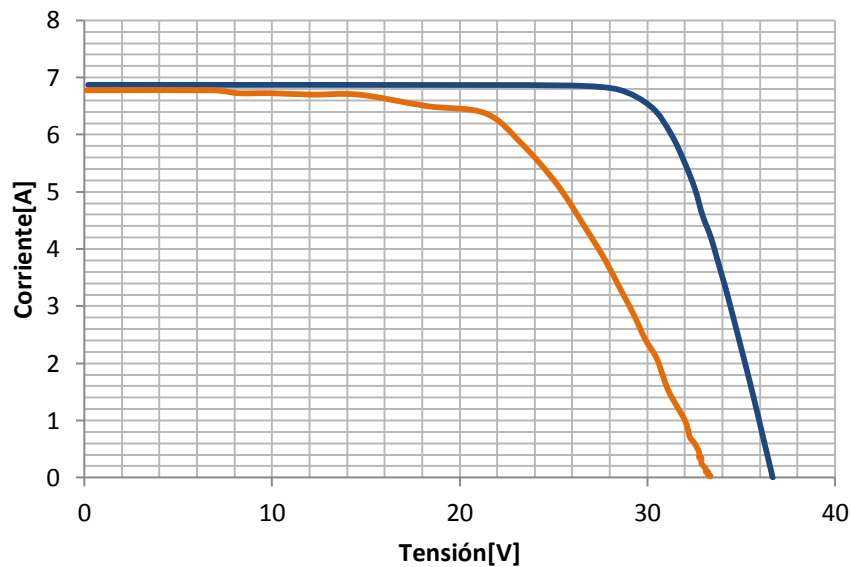


Figura 35. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 838 [w/m²].

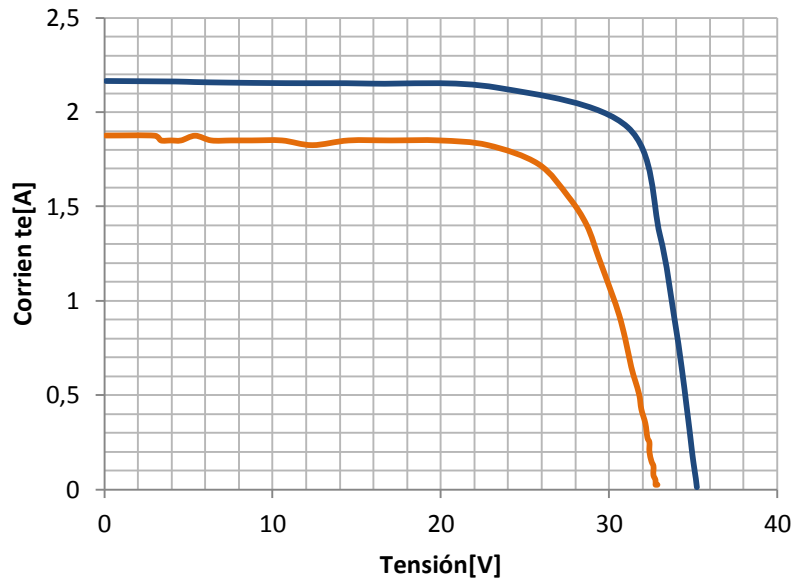


Figura 36. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 250 [w/m²].

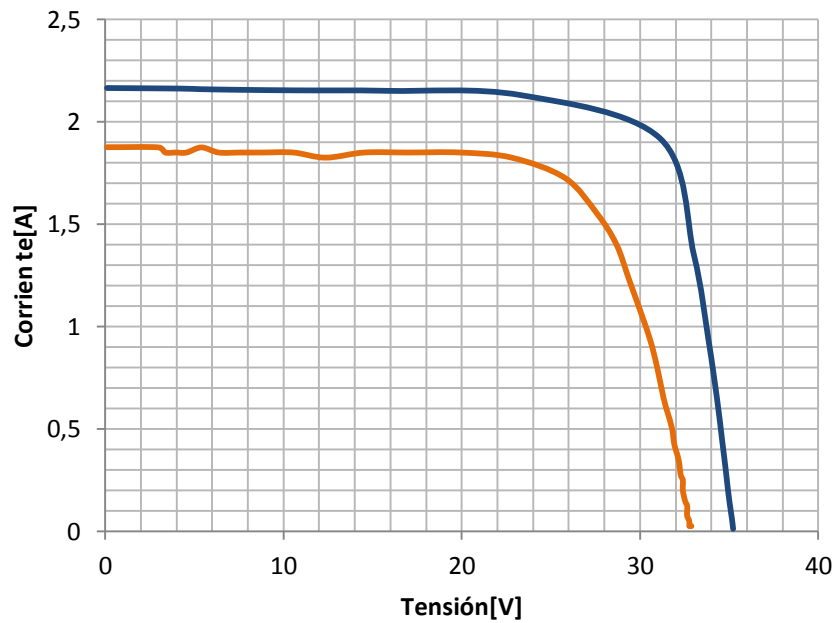
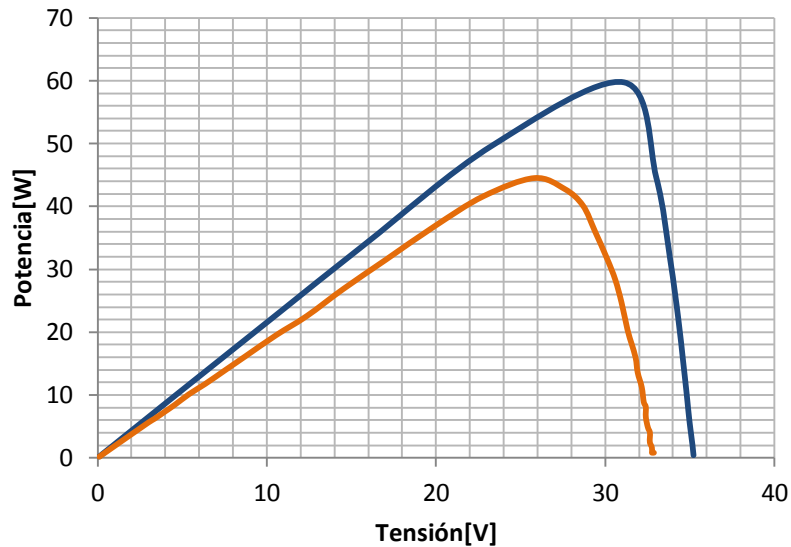


Figura 37. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (naranja) a 30[°C] y 250 [w/m²].



El valor de corriente de corto circuito es muy parecido al valor obtenido en las simulaciones (ver figuras 34 y 36), se ve una diferencia superior en la comparación de curvas P vs V para 250[w/m²] (ver figura 37).

Por otro lado, en las gráficas se observa la curva característica de potencia y su valor máximo. Este valor de potencia está por debajo del valor obtenido en simulación (ver figuras 35 y 37), para las condiciones de irradiancia equivalentes. Siendo mayor la diferencia entre el valor de potencia simulado y experimental para un nivel de irradiancia de 800[w/m²]. Adicionalmente se observa que el rango de tensión experimental es más bajo que el obtenido en simulación.

Haciendo análisis de las condiciones de la instalación de los paneles en la sede de la UIS parque tecnológico de guatiguará, se advierte que esta caída de tensión y caída en la potencia suministrada por el panel es debida a pérdidas en los conductores durante el trayecto desde el lugar donde está el panel instalado hasta el lugar donde está el tablero de conexión y adicionalmente se presentan

variaciones por efecto de la temperatura debido a que la temperatura en la celda es mayor que la temperatura ambiente.

Por lo anterior se hace necesario comparar las características experimentales con unas nuevas características simuladas donde se tiene en cuenta tanto las perdidas en los conductores como las pérdidas causadas por la caída de tensión efecto de la temperatura en las celdas.

Para obtener la temperatura en el panel fotovoltaico se cambia la temperatura obtenida de la estación meteorológica (T_a) del esquema de simulación por una temperatura aproximada la cual se calcula mediante las ecuaciones (25), (26) y (27)[23], donde se necesitan parámetros como la temperatura nominal de operación de la celda T_{ONC} [11] y la irradiancia medida por la estación meteorológica (G); las pérdidas por resistencia de los conductores se calculan con la ecuación(28), teniendo en cuenta la resistencia por kilómetro del conductor en cobre calibre 10 utilizado en la instalación del panel ($R_{awg10/km}$) [24] y la distancia (D) en kilómetros de la instalación de cable.

Esta resistencia se añade en el esquema de simulación en serie entre la salida del panel y la entrada de los sensores de corriente y tensión.

$$T_{cell}(T_a, G) = T_a + G \cdot \frac{T_{ONC}-20}{800} \quad (25)$$

$$T_{cell}(838,30) = 30 + 838 \cdot \frac{45-20}{800} = 56,18^\circ[C] \quad (26)$$

$$T_{cell}(250,30) = 30 + 838 \cdot \frac{45-20}{800} = 37,81^\circ[C] \quad (27)$$

$$R_{awg10}(D) = R_{awg10/km} \cdot D = 3,28 \cdot 0,12 = 393,6[m\Omega] \quad (28)$$

Las siguientes figuras muestran las comparaciones entre las curvas características de simulación teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados y las obtenidas experimentalmente.

Figura 38. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [56,18°C] e irradiancia de 838 [w/m²].

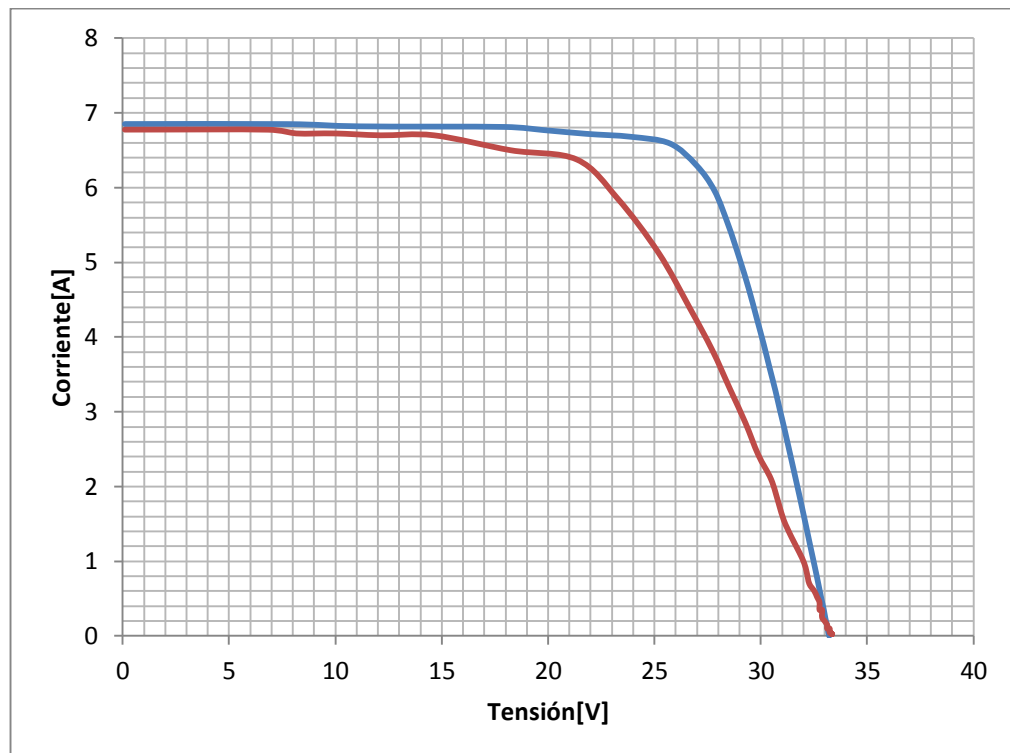


Figura 39. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [56,18°C] e irradiancia de 838 [w/m²].

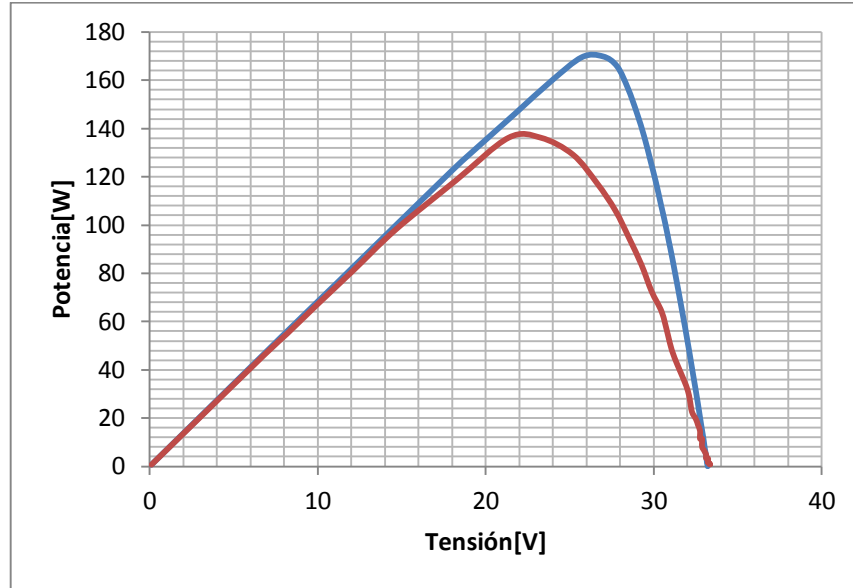


Figura 40. Comparación de características I vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [37,81°C] e irradiancia de 250 [w/m²].

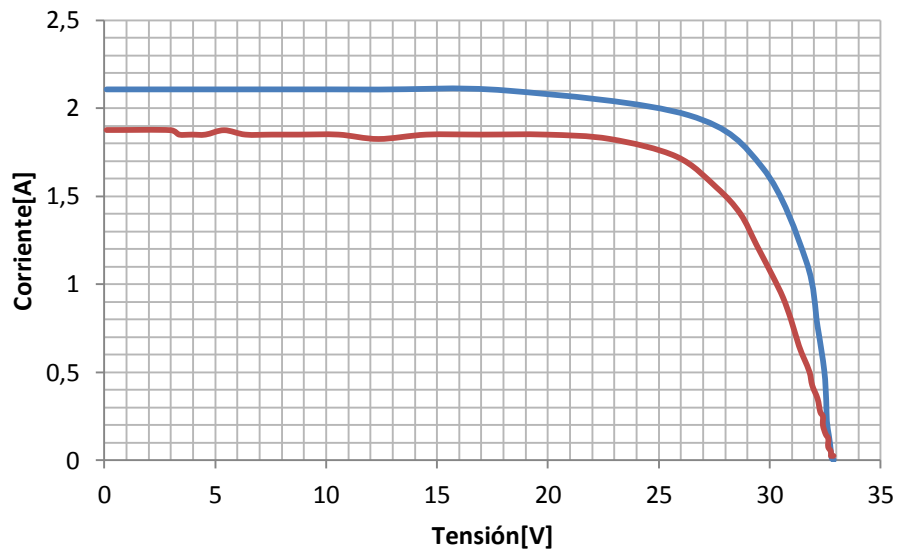
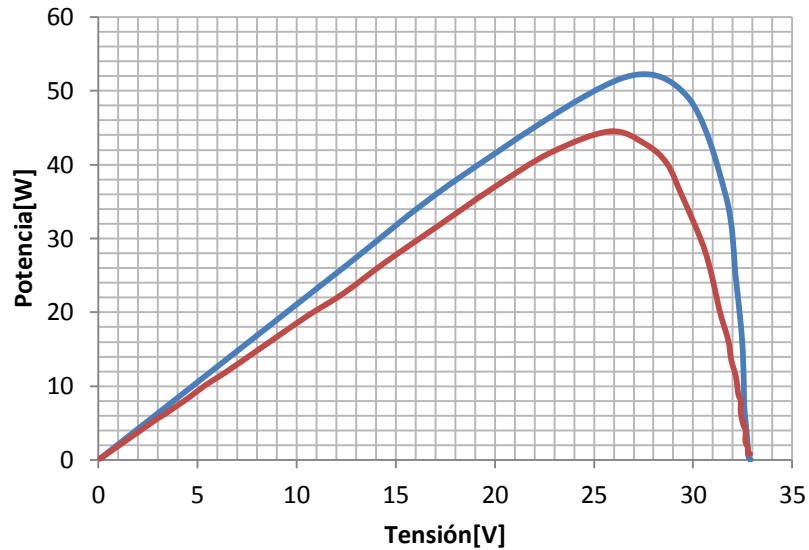


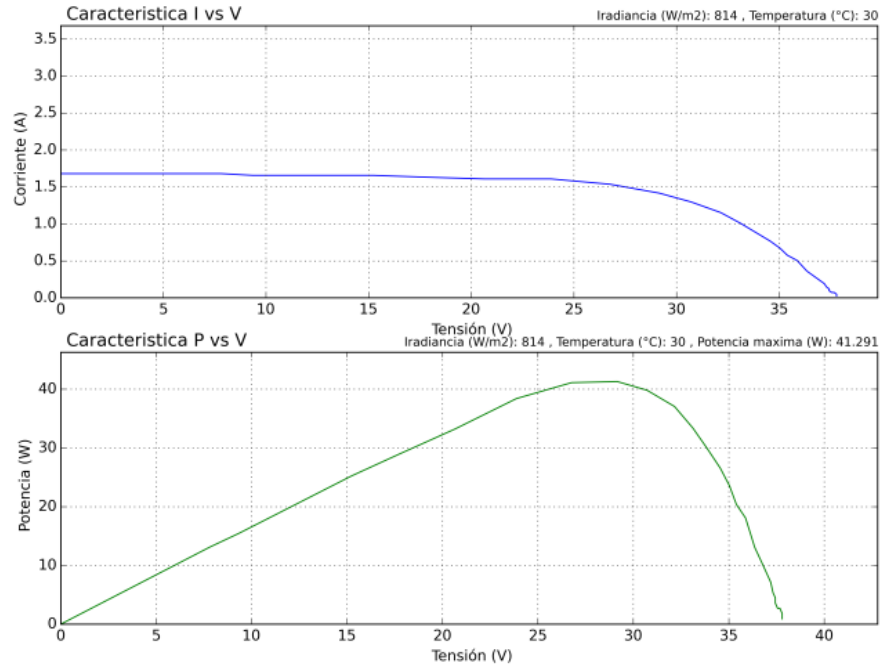
Figura 41. Comparación de características P vs V panel KYOCERA en simulación (azul) y experimental (rojo) con temperatura de celda de [37,81°C] e irradiancia de 250 [w/m²].



Analizando las figuras (34-41) se observa cómo disminuye en gran medida la variación en potencia y tensión de las curvas características obtenidas mediante simulación y las obtenidas experimentalmente al considerar los factores de pérdidas anteriormente mencionados.

A continuación se presenta la prueba realizada con el panel de referencia SP50M de 50 Wp, a una irradiancia de 814 [w/m²] y 30 [°C]. En este caso, la potencia máxima entregada por el panel es de 41.291 W. El prototipo implementado funciona también correctamente para paneles fotovoltaicos de baja potencia, en este caso 50 Wp.

Figura 42. Característica I vs V y P vs V del panel SP50M obtenida experimentalmente a 814 [w/m²] y 30[°C].



Los resultados experimentales obtenidos muestran el correcto funcionamiento del prototipo implementado para un amplio rango de paneles fotovoltaicos encontrados en el mercado.

6. OBSERVACIONES

Entre las observaciones consideradas durante la ejecución de este proyecto se resaltan las siguientes:

- Se observó que no es necesario realizar un barrido minucioso para el ciclo de trabajo en el rango comprendido entre 0 y 20%, ya que las variaciones en corriente y tensión obtenidas en ese rango eran casi nulas. Por lo tanto, en este rango de operación se selecciona un paso para el barrido del 10%. Lo anterior, permite disminuir el tiempo total de ejecución de cada prueba, lo cual reduce el margen de error que puede ser obtenido por variaciones en la irradiancia y temperatura en el intervalo de tiempo en el cual se realiza el barrido.
- Las pruebas experimentales realizadas al panel de KYOCERA mostraron una diferencia de tensión del panel de aproximadamente 3[V]. Esta caída se produce por pérdidas en los conductores entre el tablero y el sitio en el cual se encuentran instalados los paneles fotovoltaicos, ya que la distancia entre estos sitios es de aproximadamente 60 [m]. La temperatura en el panel es decisiva para corregir dicha diferencia en la tensión de circuito abierto del panel, al tener en cuenta estos aspectos en simulación se corrobora el funcionamiento del prototipo.
- Vale la pena mencionar, que el prototipo cuenta con tres borneras mediante las cuales es posible observar la señal PWM a la salida del Arduino, la tensión entre colector y emisor del IGBT y la tensión de salida del convertidor.
- Se recomienda agregar la medición de la velocidad del viento, como la posible inclusión de sensores de irradiancia y temperatura en el panel para trabajos futuros.

7. CONCLUSIONES

En el presente artículo se evidencia el diseño e implementación de un convertidor DC/DC SEPIC controlado mediante un algoritmo que varía su ciclo de trabajo, permitiendo emular una resistencia variable y así obtener el conjunto de valores de tensión y corriente necesarios para la obtención de las curvas características de paneles fotovoltaicos.

Se realizó la simulación del sistema propuesto y se corroboró el funcionamiento del sistema, las curvas obtenidas en las simulaciones no difieren de las curvas características presentadas por los fabricantes.

Se analizó el comportamiento del prototipo experimental durante pruebas con diversos niveles de irradiancia y temperatura, obteniendo resultados satisfactorios en la caracterización de paneles fotovoltaicos de hasta 240 [W].

El algoritmo implementado permite guardar los datos sensados y las curvas características en archivos independientes.

Teniendo en cuenta las pruebas realizadas, aparte de ratificar el funcionamiento del prototipo se concluye que este puede ser expandido para caracterizar arreglos de paneles fotovoltaicos de mayor potencia, aumentando la capacidad de la resistencia de carga.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Asociación de Productores de Energías Renovables, “Impactos ambientales de la producción de electricidad,” p. 42, 2011.
- [2] Y. García Carrascal and J. Mantilla Gamarra, “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CD/CD PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA DE GENERADORES FOTOVOLTAICOS,” Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [3] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia*, Segunda. México: PRENTICE HALL S.A, 2001.
- [4] E. Durán, J. M. Andújar, J. M. Enrique, and J. M. Pérez-Oria, “Determination of PV generator I-V/P-V characteristic curves using a DC-DC converter controlled by a virtual instrument,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, 2012.
- [5] K. I. Inc, “I-V Characterization of Photovoltaic Cells Using the Model 2450 SourceMeter® Source Measure Unit (SMU) Instrum,” no. 3224, 2014.
- [6] E. Durán, J. Galán, M. Sidrach-de-Cardona, and J. M. Andújar, “A new application of the buck-boost-derived converters to obtain the I-V curve of photovoltaic modules,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 413–417, 2007.
- [7] D. W. Hart, *ELECTRÓNICA DE POTENCIA*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A, 2001.
- [8] S. Sousa, M. Onofre, T. Antunes, C. Branco, J. Maia, J. Rocha, and V. F. Pires, “Implementation of a low cost data acquisition board for photovoltaic arrays analysis and diagnostic,” no. October, pp. 20–23, 2013.
- [9] M. Dimitrijevic, M. Andrejevic Stosovic, Z. Petrusic, and D. Lukac, “Experimental Characterization of the Pv Panel - Converter Interface,” pp. 11–14, 2012.
- [10] V. Boscaino, G. Cipriani, V. Di Dio, R. Miceli, G. Prestigiacomo, and a. Pulizzotto, “A DC-DC power converter for PV module characterization,” 2014

Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, 2014.

- [11] KYOCERA, “KD240GH Multicrystal Photovoltaic Module (Datasheet).”
- [12] J. (Texas I. I. Falin, “Designing DC / DC converters based on SEPIC topology,” *Analog Appl. J.*, pp. 18–23, 2008.
- [13] W. Gu and D. Zhang, “Designing A SEPIC Converter,” pp. 1–8, 2008.
- [14] T. Instruments, “Application Report, AN-1484 Designing a SEPIC converter,” no. April, 2013.
- [15] I. Gil Mera, “DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS.”
- [16] Semikron, “SKYPER 32R.” [Online]. Available: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-driver/detail/skyper-32-r-l6100102.html>.
- [17] Semikron, “Board 1 SKYPER 32 R.” [Online]. Available: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-driver/detail/board-1-skyper-32-r-l6100131.html>.
- [18] F. Miyara, “Fuentes Reguladas,” Universidad Nacional de Rosario, Rosario, 2009.
- [19] LEM, “Voltage Transducer LV 25-P,” *Data Sheet*, pp. 18–20, 2013.
- [20] LEM, “Current Transducer LA 25-NP,” *Data Sheet*, pp. 12–14, 2011.
- [21] Arduino, “Arduino board Mega 2560.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>.
- [22] Semikron, “Datasheet SKM 50GB123D,” pp. 4–9, 2006.
- [23] Ingelibre, “Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica,” *Noviembre 9*, 2014. [Online]. Available: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>.
- [24] Cables CONDUMEX, “Tablas de características dimensionales, peso y resistencia eléctrica conductores,” no. 720. 2011.

BIBLIOGRAFÍA

GARCÍA CARRASCAL, Yuliany y MANTILLA GAMARRA, Jesús, Implementacion de un convertidor DC/DC para el seguimiento del punto maxima potencia de generadores fotovoltaicos. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2013.

DURÁN, E, ANDÚJAR, ENRIQUE, J.M. and PÉREZ-ORIA, J.M., Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument. International Journal of Photoenergy, Vol 2012. [cited: 10 Dic 2015]

DURÁN, E, *et al.* A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference,[online] 2007.

DIMITRIJEVIC, Marko, *et.al.* Experimental characterization of the pv panel - converter interface. Proc. 56th ETRAN Conference [online] , Zlatibor, June 11-14, 2012 [cited: 3 Nov. 2015] Available from: <http://leda.elfak.ni.ac.rs/publications/pdf/Conferences/2012/ETLAN/Experimental%20Characterizati on%20of%20The%20PV%20Panel%20-%20Converter%20Interface.pdf>

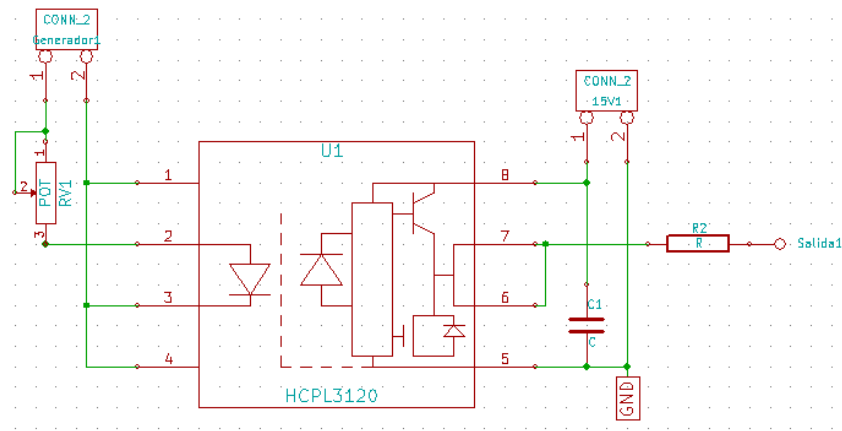
ANEXOS

Anexo A. Pcb optoacoplador hcpl3120.

Como protección a la tarjeta Skyper 32R de Semikron se diseña una tarjeta con un optoacoplador HCPL3120 utilizando el software libre KICAD. A continuación se muestran las capturas del esquemático y del circuito impreso.

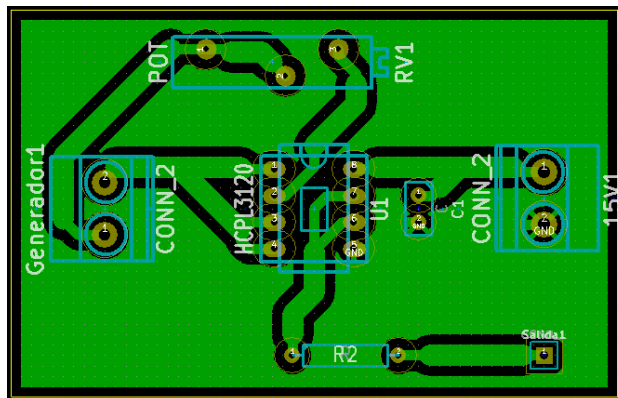
Esquemático Circuito.

Fig. A1 Esquemático tarjeta del HCPL3120.



Circuito Impreso.

Fig. A2 PCB tarjeta del HCPL3120.

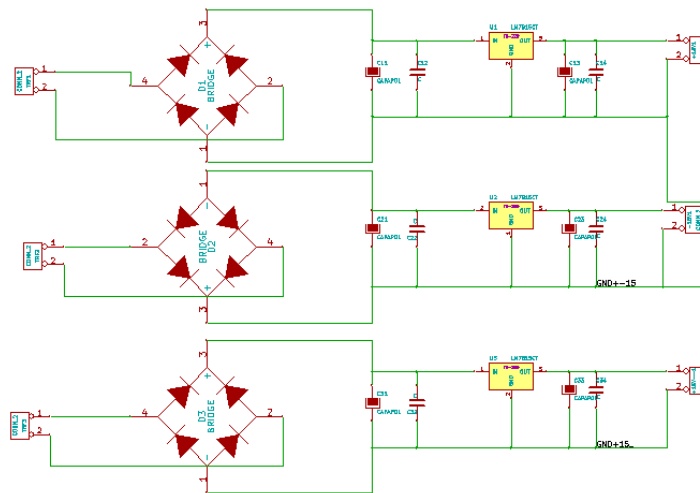


Anexo B. Fuente de alimentación.

A continuación se presenta el esquemático y el circuito impreso de la fuente de alimentación del prototipo, realizados mediante el software de diseño de circuitos impresos KICAD de código abierto.

Esquemático Circuito.

Fig. A3 Esquemático tarjeta de la fuente de alimentación.



Circuito Impreso.

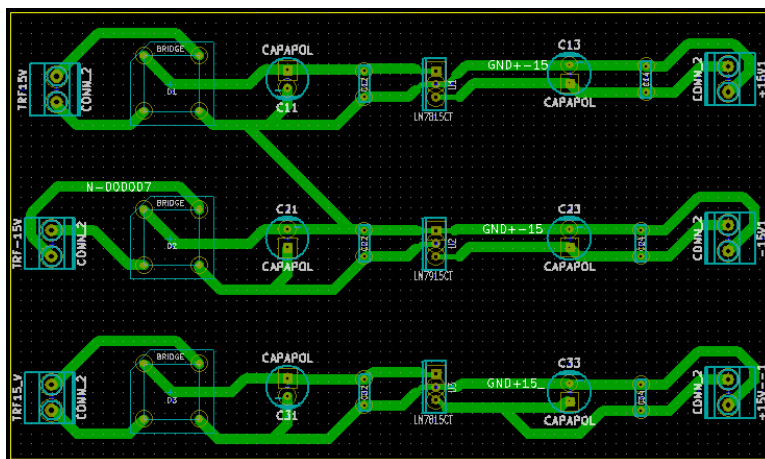


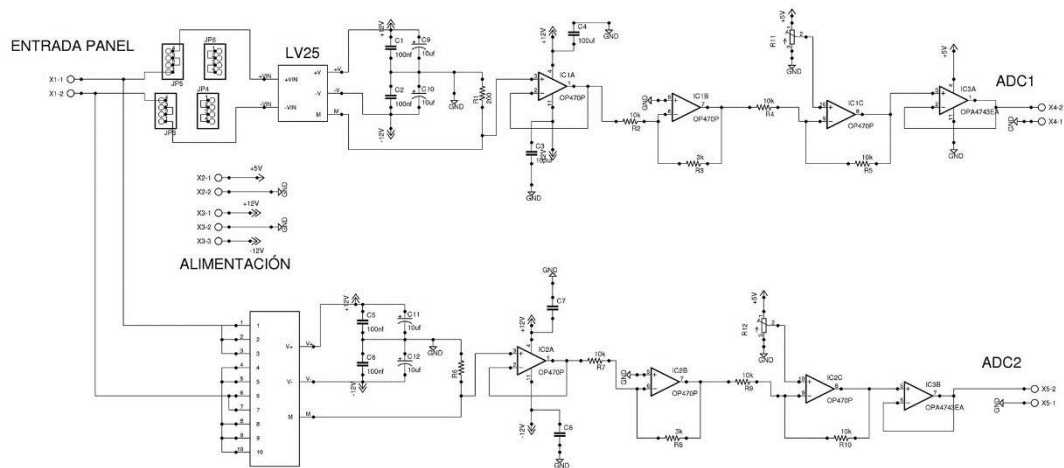
Fig. A4 PCB tarjeta de la fuente de alimentación.

Anexo C. Tarjeta de sensado.

Para sensar la tensión y corriente en la entrada del convertidor se utilizó una tarjeta con los sensores LV25 y LA25. La tarjeta se ajustó para medir señales de tensión entre 0[V] a 60 V y de corriente hasta 12 [A]. Las dos señales de salida de los sensores son ajustadas a niveles entre 0[V] a 5[V] para ser leídas posteriormente por el Arduino. A continuación se presenta el esquemático de la tarjeta y su circuito impreso.

Esquemático tarjeta sensores

Fig. A5 Esquemático tarjeta sensores.



Fuente: [2]

Circuito impreso sensores de tensión y corriente.

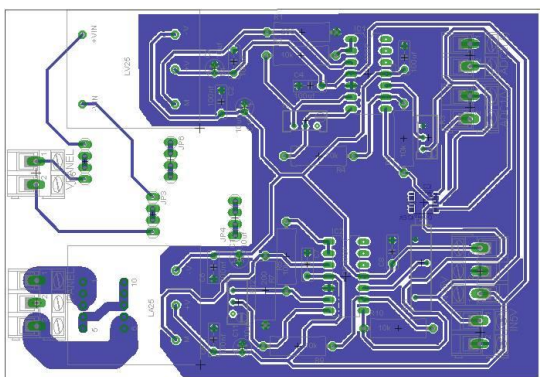


Fig. A6 PCB tarjeta sensores.

Fuente: [2]

Anexo D. Programa arduino PWM variable.

A continuación se presenta el script utilizado para generar el PWM variable y realizar el barrido del ciclo de trabajo del convertidor.

Nombre archivo: pwm_proyecto_v2.ino.

```
//-----//  
//----- PWM frecuencia variable ----//  
//-----//  
  
// librerias //  
#include <PWM.h>  
  
// variables  
String ch;  
int pin = 11;  
int j=0;  
int bar = 5;  
  
double entvolt=0;  
double entcorr=0;  
double sumvoltaje=0;  
double sumcorriente=0;  
double e=0;  
  
double totvoltaje=0;  
double totcorriente=0;  
  
char aux[200];
```

```

char f1[20];
char f2[20];

uint16_t dut=1;
int32_t frecuencia = 20000;
bool completo;

//---- ENTIDAD ----//
void setup()
{

    // inicio PWM
    InitTimersSafe();
    completo = SetPinFrequencySafe(pin, frecuencia);

    if (completo)
    {
        pinMode(13, OUTPUT);
        digitalWrite(13, HIGH);
    }

    // pwm inicial
    bar=0;
    dut=(bar*65535)/100;
    pwmWriteHR(pin, dut);

    // inicio serial
    Serial.begin(19200);
    delay(1000);

```

```

}

//---- ARQUITECTURA ----//
void loop()
{

  while (Serial.available() > 0)
  {
    ch = Serial.readStringUntil('\n');
  }

  if (ch != 0)
  {
    if (ch == "inicio")
    {
      Serial.println("enlinea");
      // receptor de comandos //
      adquisicion();
    }
    else
    {
      Serial.println("nada");
    }
    ch = "";
  }
  delay(500);
}

void adquisicion()

```

```

{
  // inicio de PWM
  // empieza en 10%
  bar=10;
  dut=(bar*65535)/100;
  pwmWriteHR(pin, dut);
  delay(4000);

  // sigue en 20%
  bar=20;

do
{
  // ajuste del ciclo de trabajo
  dut=(bar*65535)/100;
  pwmWriteHR(pin, dut);
  delay(2000);

  // medida de tensión y corriente - promedio
do
{
  //#####//
  // codigo de adquisicion aqui
  entvolt=(analogRead(0)*5.0)/1023.0; // voltaje
  entcorr=(analogRead(1)*5.0)/1023.0; // corriente
  //#####//
  sumvoltaje= sumvoltaje + entvolt;
  sumcorriente= sumcorriente + entcorr;
  e++;
  delay(10);
}
}

```

```

}while(e<100);

// totales - promedio
totvoltaje=(sumvoltaje/e);
totcorriente=(sumcorriente/e);

//--- float to int ---//
//dtostrf(totvoltaje, 9, 4, f1);
//dtostrf(totcorriente, 9, 4, f2);
//-----//

Serial.print(totvoltaje);
Serial.print(",");
Serial.print(totcorriente);
Serial.print(",");
Serial.println(bar);

// aumento de ciclo de trabajo
if(bar==94)
{
    // salir
    bar=10;
    e=0;
    sumvoltaje=0;
    sumcorriente=0;
    totvoltaje=0;
    totcorriente=0;

    break;
}

```

```
else
{
    // incremento
    bar=bar+2;
    e=0;
    sumvoltaje=0;
    sumcorriente=0;
    totvoltaje=0;
    totcorriente=0;
}
delay(1000);
}while(true);

delay(1000);

// valor inicial de pwm
bar=0;
dut=(bar*65535)/100;
pwmWriteHR(pin, dut);

Serial.println("salido");
}
```

PROGRAMA PYTHON ADQUISICIÓN DE DATOS

A continuación se presenta el script utilizado para realizar la adquisición de datos y para generar las curvas características del panel fotovoltaico.

Nombre archivo: `adq_pwm_v2.py`

```
import sys, csv
import matplotlib
from matplotlib import pyplot
import serial
from time import sleep
import mens_inicio
import warnings

warnings.filterwarnings("ignore")

#-- configuracion puerto serial --#
ser = serial.Serial()
ser.port = "COM4"
#ser.port = "/dev/ttyUSB0"
ser.baudrate = 19200

ser.open()
ser.flushInput()
ser.flushOutput()
mens_inicio.portada()

#--- variables ---#
```

```

p1=[0]*25
p2=[0]*25

global x1,y1,x2,y2
x1=[];y1=[]
x2=[];y2=[]

while True:

    comando=str(input(' comando >> '))

    if comando=="salir":
        break

    if comando=="inicio":
        comando=comando+'\n'

    iradiancia=str(input('valor de Iradiancia (W/m2)?:
'))
    temperat=str(input('valor de Temperatura (°C)?: '))

    valor_annot=' Iradiancia (W/m2): '+iradiancia+' ,
Temperatura (°C): '+temperat

    print("---- iniciando captura ----")
    pyplot.ion()
    pyplot.figure(figsize=(12,13))
    pyplot.subplot(211)
    pyplot.title(' Caracteristica I vs V ',loc='left')

```

```

pyplot.xlabel(' Tensión (V)')
pyplot.ylabel(' Corriente (A)')
pyplot.title(valor_annot,loc='right',fontsize=10)
pyplot.grid(True)
l1, =pyplot.plot(p1,linewidth=2,color='c')

pyplot.subplot(212)
pyplot.title(' Caracteristica P vs V ',loc='left')
pyplot.xlabel(' Tensión (V)')
pyplot.ylabel(' Potencia (W) ')
pyplot.title(valor_annot,loc='right',fontsize=10)
pyplot.grid(True)
l2, =pyplot.plot(p2,linewidth=2,color='m')

#--- archivo ---#
archivo='caracteristica_iv'
archil=archivo+'.txt'
g=open(archil,'w') # archivo salida

ser.write(comando.encode())

line=str(ser.readline().decode().replace('\n','').replace('\r', ''))

print(line)
i=0
potencia=0
while True:
    i=i+1

```

```

line=str(ser.readline().decode().replace('\n','').replace('\r', ''))

    print(line)

    if line=='salido':

        g.close()
        break
    line1=line.replace(",","\t")+'\n'
    g.write(line1)

    x,y,z=line.split(',')

    # x= voltaje -> 5V - 60V
    # y= corriente -> 5V - 12A
    # z= ciclo
    # x1 = voltaje
    # y1 = corriente

    # agregar datos #
    x1.append((float(x)*60)/5)
    y1.append((float(y)*12)/5)

potencia=float(((float(x)*60)/5)*((float(y)*12)/5))
    x2.append((float(x)*60)/5)
    y2.append(round(potencia,3))

    l1.set_xdata(x1)

```

```

l1.set_ydata(y1)

l2.set_xdata(x2)
l2.set_ydata(y2)

pyplot.subplot(211)
pyplot.xlim([min(x1)-5,max(x1)+5])
pyplot.ylim([min(y1)-5,max(y1)+5])
pyplot.subplot(212)
pyplot.xlim([min(x2)-5,max(x2)+5])
pyplot.ylim([min(y2)-5,max(y2)+5])
pyplot.pause(0.01)
#pyplot.draw()

line=""
line1=""
#--- grafica final ---#
#--- ajuste de grafica ---#
ini_voltaje=float(x1[len(x1)-1])
ini_corriente=float(y1[len(y1)-1])
poten=0
while ini_voltaje > 0:

    x1.append(ini_voltaje)
    y1.append(ini_corriente)

    poten=float((ini_voltaje)*(ini_corriente))
    x2.append(ini_voltaje)
    y2.append(round(poten,3))

```

```

        ini_voltaje=ini_voltaje-0.1
#-----#
pyplot.close()
pyplot.figure(figsize=(12,13))
pyplot.subplot(211)
pyplot.title(' Caracteristica I vs V ',loc='left')
pyplot.xlabel(' Tensión (V) ')
pyplot.ylabel(' Corriente (A) ')
pyplot.title(valor_annot,loc='right',fontsize=10)
pyplot.grid(True)
l4, =pyplot.plot(x1,y1,linewidth=1,color='b')
pyplot.xlim([0,max(x1)+2])
pyplot.ylim([0,max(y1)+2])

pyplot.subplot(212)
pyplot.title(' Caracteristica P vs V ',loc='left')
pyplot.xlabel(' Tensión (V) ')
pyplot.ylabel(' Potencia (W) ')
valor_annot=valor_annot+' , Potencia maxima (W):
'+str(max(y2))
pyplot.title(valor_annot,loc='right',fontsize=10)
pyplot.grid(True)
l5, =pyplot.plot(x2,y2,linewidth=1,color='g')
pyplot.xlim([0,max(x1)+5])
pyplot.ylim([0,max(y2)+5])

archivo='caracterizacion_panel'
archi2=archivo+'.png'
pyplot.savefig(archi2,dpi=500) # grafica de salida
pyplot.ioff()

```

```
break
```

```
#--- salir ---#  
print('salir')  
ser.close()
```

Anexo E. Instructivo instalación y ejecución software prototipo.

El software utilizado para la adquisición de datos del prototipo es Python. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License. Para el correcto funcionamiento del prototipo se deben tener instalados en el ordenador los siguientes programas:

| | |
|---|---|
| Anaconda | https://www.continuum.io/downloads |
| Librería Python Serial | https://pypi.python.org/pypi/pyserial#downloads |
| Arduino | https://www.arduino.cc/en/Main/Software |
| Drivers Arduino Mega 2560 (Se encuentra dentro del software arduino Carpeta “Drivers”) | |
| Librería PWM Arduino : | |
| | https://www.dropbox.com/sh/k12sluuxz0ce75f/AACIOd5ubVZqz3AXwAEsyG6Ca?dl=0 |

La instalación de los programas Anaconda y Arduino son muy amigables por lo tanto no se hace énfasis en su instalación, por otra parte se explica la instalación de las librerías la cual se realiza luego de instalar Anaconda y Arduino.

Instalación librería Serial de Python.

Posterior a su descarga se debe descomprimir la carpeta “pyserial-3.0.1” en una ruta conocida para el usuario, en este caso la raíz del disco D (ruta, D:\ pyserial-3.0.1).

Abrir la consola de comandos de Windows, en el explorador de windows, mantener oprimida la tecla Shift y presionar clic derecho en el disco D, se abre un menú en el cual se accede a la opción “Abrir ventana de comandos aquí”, se abre la consola de comandos en la raíz del disco D, se escribe el comando dir seguido

de la tecla enter, este comando permite visualizar las carpetas en dicha ruta, se observa la carpeta “pyserial-3.0.1”, se ingresa el comando `cd pyserial-3.0.1` para entrar en la carpeta; para realizar la instalación de la librería se introduce el comando `python setup.py install` con esto queda instalada la librería serial.

Para cargar la librería PWM del arduino se copia la carpeta descargada en la ruta `C:\Users\Nombre usuario\Documentos\Arduino\libraries`, arduino crea una carpeta en documentos y allí se debe incluir la librería para ser utilizada.

A continuación se mencionan una serie de pasos para ejecutar el programa de adquisición de datos del cual se obtienen las curvas características.

Se debe cargar en el arduino el script “`pwm_proyecto_v2.ino`” teniendo en cuenta el puerto en el que está conectado el arduino Mega (COMX).

Abrir la interfaz de anaconda

Para abrir el programa, se debe abrir la ruta donde se instaló, se abre la carpeta, luego se ingresa a la carpeta llamada “lib”, posteriormente se abre la carpeta “idlelib” y se ejecuta con doble clic el archivo “idle”.

Estando en la interfaz de anaconda se procede a abrir el script de la adquisición “`adq_pwm_v2.py`”, mediante el atajo `Ctrl+o`.

Nota: se debe verificar en las primeras líneas del script el puerto de conexión del arduino, si no corresponde al puerto actual se debe modificar, esto debido a que no todos los ordenadores cuentan con los mismos puerto y el puerto de conexión puede variar.

Se ejecuta el programa con la tecla `F5`, para dar inicio a la adquisición se debe escribir el comando “inicio” seguido de la tecla `Intro`, luego el programa solicita al usuario ingresar los valores de irradiancia y temperatura los cuales se obtienen de

una estación meteorológica, se ingresan los valores y se oprime la tecla Intro, inmediatamente el programa inicia el barrido del ciclo de trabajo, generando en tiempo real las curvas características.

En la carpeta donde se encuentra el archivo “adq_pwm_v2.py”, se guardan dos archivos, los datos sensados en formato txt y las curvas características en formato png.