

**PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS
INCORPORANDO FUNCIONES DE VISUALIZACIÓN DE DATOS Y SENSADO
DE VARIABLES METEOROLÓGICAS**

**SNEYHER ANGARITA ARENAS
NEIFER DAVID SANDOVAL HERNÁNDEZ**

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

2017

**PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS
INCORPORANDO FUNCIONES DE VISUALIZACIÓN DE DATOS Y SENSADO
DE VARIABLES METEOROLÓGICAS**

**SNEYHER ANGARITA ARENAS
NEIFER DAVID SANDOVAL HERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Directora:

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Magíster en Ingeniería Electrónica

Doctora en Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Gestión y Desarrollo

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

2017

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	18
2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS DE SENSADO DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS	21
2.1 SENSOR DE TEMPERATURA DEL PANEL	21
2.2 SENSOR DE IRRANDIANCIA	25
2.3 FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE SENSADO IMPLEMENTADOS	29
3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	32
3.1 SENSOR DE TEMPERATURA DEL PANEL.	32
3.2 SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE Y HUMEDAD	33
3.3 SENSOR DE IRRADIANCIA	34
3.4 GLOBAL POSITION SYSTEM (GPS)	35
3.5 MÓDULO WIFI	36
3.6 TARJETA ARDUINO	37
3.7 SEÑAL DE CORRIENTE Y TENSIÓN DEL PANEL	38
4. RESULTADOS	46
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	46
4.1.1 Resultados para el Panel Trinasolar de 255w	48
4.1.2 Resultados para el Panel Synthesis Power de 50w	49
4.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN	50
4.2.1 Resultados para el Panel Trina Solar de 255 W	51
4.2.2 Panel Synthesis Power de 50 W	53
4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	55
4.3.1 Panel Trina Solar de 255 W	55
4.3.2 Panel Synthesis Power 50 W	56

5. OBSERVACIONES	58
6. CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	68

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Curva característica I-V con irradiancia constante para diferentes valores de temperatura	19
Imagen 2. Curva característica I-V con temperatura constante para diferentes valores de irradiancia.....	19
Imagen 3. Curva característica I-V (línea negra) y P-V (línea roja).....	20
Imagen 4. Puente de Wheatstone activo	22
Imagen 5. Circuito configuración inversora	23
Imagen 6. Comparación de temperatura calculada por la medida de la resistencia de la RTD y la tensión de salida del circuito	24
Imagen 7. Comparación de temperatura medida para el Heidolph Rotary Evaporators y sensor RTD.....	25
Imagen 8. Amplificador de transimpedancia con modelo del fotodiodo y capacitores de compensación de ruido y fase	26
Imagen 9. Datos para obtener el factor de calibración.....	29
Imagen 10. Esquema del Prototipo.....	32
Imagen 11. PT1000, sensor de temperatura	33
Imagen 12. Sensor AM2305 (Temperatura ambiente y humedad relativa).....	34
Imagen 13. Piranómetro	35
Imagen 14. GPS NEO-7M	36
Imagen 15. Módulo WiFi Serial ESP-07.....	36
Imagen 16. Arduino MEGA 2560	37
Imagen 17. Esquema del prototipo "Implementación de un Prototipo para la Caracterización de Paneles Fotovoltaicos"	38
Imagen 18. Pantalla LCD.....	39
Imagen 19. Shield starterd kid para pantalla LCD.....	40
Imagen 20. Pantalla de inicio del prototipo	40

Imagen 21. Menú de opciones (captura, sensores, guardado, configuración).....	41
Imagen 22. Interfaz de caracterización del prototipo	41
Imagen 23. Visualización de las variables sensadas	42
Imagen 24. Opciones de memoria	42
Imagen 25. Menú con opciones de "TRANSMITIR" o "VISUALIZAR"	43
Imagen 26. Curva característica Potencia vs Tensión obtenida por el prototipo ...	43
Imagen 27. Curva característica Corriente vs Tensión obtenida por el prototipo...	43
Imagen 28. Opciones para enviar los datos.....	44
Imagen 29. Servidor de prueba.....	44
Imagen 30. Menú de configuración.....	45
Imagen 31. Prototipo para la caracterización de paneles fotovoltaicos	47
Imagen 32. Curva característica experimental de Corriente vs Tensión panel Trina Solar de 255 W	48
Imagen 33. Curva característica experimental de Potencia vs Tensión panel Trina Solar de 255 W	48
Imagen 34. Curva característica experimental de Corriente vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W	49
Imagen 35. Curva característica experimental de Potencia vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W	49
Imagen 36. Esquema de simulación del prototipo en PSIM.....	50
Imagen 37. Parámetros de simulación del panel solar de 255 W	51
Imagen 38. Curva característica simulada de Corriente vs Tensión panel Trina Solar de 255 W	52
Imagen 39. Curva característica simulada de Potencia vs Tensión panel Trina Solar de 255 W	52
Imagen 40. Parámetros de simulación del panel solar de 50 W	53
Imagen 41. Curva característica simulada de Corriente vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W	54
Imagen 42. Curva característica simulada de Potencia vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W	54

Imagen 43. Comparación de curvas características Corriente vs Tensión del panel Trina Solar de 255 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja).....	55
Imagen 44. Comparación de curvas características Potencia vs Tensión del panel Trina Solar de 255 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja).....	56
Imagen 45. Comparación de curvas características Corriente vs Tensión del panel Synthesis Power de 50 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja).....	56
Imagen 46. Comparación de curvas características Potencia vs Tensión del panel Synthesis Power de 50 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja).....	57
Imagen 47. Esquemático sensor de irradiancia	68
Imagen 48. Respuesta en frecuencia (Magnitud y Fase).....	69
Imagen 49. Variación de la corriente en el fotodiodo, barrido en DC.....	69
Imagen 50. PCB sensor de irradiancia	70
Imagen 51. Esquemático del sensor de temperatura del panel	71
Imagen 52. PCB sensor de temperatura del panel	72
Imagen 53. Esquemático Shield de acople para los sensores a la tarjeta Arduino	73
Imagen 54. PCB Shield de acople para los sensores a la tarjeta Arduino	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes de la etapa de sensado de temperatura	23
Tabla 2. Componentes del circuito de sensado de irradiancia.....	28
Tabla 3. Componentes del circuito regulador de tensión	31

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Sensor de Irradiancia (Piranómetro)	68
Anexo B. Sensor de Temperatura del Panel.	71
Anexo C. Shield para el Acople de los Circuitos de Sensado al Arduino.	73

RESUMEN

TITULO: PROTOTIPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS INCORPORANDO FUNCIONES DE VISUALIZACIÓN DE DATOS Y SENSADO DE VARIABLES METEOROLÓGICAS*

AUTORES: SNEYHER ANGARITA ARENAS
NEIFER DAVID SANDOVAL HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: Irradiancia, variables meteorológicas, curvas características, paneles solares, punto de máxima potencia

DESCRIPCION

Conocer las curvas características de un panel fotovoltaico es importante con el fin de determinar su comportamiento y encontrar el punto de mayor eficiencia. Las hojas de datos proporcionadas por los fabricantes de los paneles presentan las curvas características obtenidas a temperatura e irradiancia constante. Sin embargo, las curvas características varían según las condiciones meteorológicas a las que está expuesto el panel, por ello el comportamiento de éste se ve ligado a la zona geográfica en la que está instalado.

Por lo tanto, la caracterización en tiempo real de los paneles solares es una mejor alternativa para el uso eficiente y aprovechamiento de la energía solar.

En este proyecto de grado se implementa un prototipo mejorado con un sistema de sensado y una interfaz que permite visualizar las curvas características de paneles fotovoltaicos corriente vs. tensión (I-V) y potencia vs. tensión (P-V), según las condiciones meteorológicas a las que esté expuesto el panel, donde este se ve mayormente afectado por la temperatura y la irradiancia.

El prototipo implementado cuenta con los siguientes módulos: sensores para la medición de temperatura ambiente, temperatura del panel e irradiancia, módulo GPS (*Global Positioning System*), módulo WiFi, además de una pantalla táctil que permite la visualización de las variables sensadas e interacción con el prototipo, entre otras funcionalidades.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS. Magister en Ingeniería Electrónica. Doctora en Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Gestión y Desarrollo.

ABSTRACT

TITLE: PROTOTYPE FOR THE CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS INCORPORATING FUNCTIONS OF DATA VISUALIZATION AND SENSING OF METEOROLOGICAL VARIABLES

AUTHORS: SNEYHER ANGARITA ARENAS
NEIFER DAVID SANDOVAL HERNÁNDEZ**

KEYWORDS: irradiance, meteorological variables, Maximum power point, solar panel, characterization curves

DESCRIPTION:

Knowing the photovoltaic panel characteristic curves is important in order to determine the behavior and finding the maximum efficiency point. Datasheets provided by the manufacturers depict characteristic curves at fixed temperatures and irradiances. However, characteristic curves vary according to meteorological conditions, since that behavior is linked to the geographical area where the panels are installed.

So, real time characterization of photovoltaic panels is a more suitable alternative for taking advantage of solar energy.

This undergrad project implements a prototype that allows visualizing photovoltaic panels characteristic curves, according to the meteorological conditions to which it is exposed.

The implemented prototype includes the following modules: environment temperature, panel temperature and irradiance sensors, GPS module, WiFi module and a touch screen that allows the visualization of the sensed variables and interaction with the prototype, among others.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora: MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS. Magister en Ingeniería Electrónica. Doctora en Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Gestión y Desarrollo.

INTRODUCCIÓN

El mayor porcentaje de la energía usada actualmente es generada por combustible fósil (carbón, gas natural, petróleo y sus derivados), utilizar estos combustibles genera CO₂ que es un gran contaminante del medio ambiente, por su alta producción provoca el efecto invernadero [1]. Se hace necesario buscar nuevas fuentes de energía para disminuir el impacto ambiental y cubrir la demanda energética, como lo es el uso de energías renovables, que es considerado como una de las mejores alternativas para la producción de energía eléctrica de una forma menos contaminante. El uso de este tipo de energía es cada día más importante debido a la necesidad de tener un desarrollo sostenible con el planeta, en particular la energía solar fotovoltaica, una energía renovable e inagotable, tema de estudio de este trabajo de grado.

En términos generales, una celda solar es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico. El comportamiento de las celdas solares depende de las condiciones de irradiancia y temperatura a las cuales se encuentran expuestas las celdas, estas variables meteorológicas afectan directamente la corriente, la tensión y la potencia generada. La tecnología con la que actualmente operan los paneles fotovoltaicos comerciales presenta bajas eficiencias (eficiencias del orden del 21% para paneles mono-cristalinos y 17% para paneles poli-cristalinos) [2] [3] por tanto, en instalaciones fotovoltaicas de gran capacidad se hace necesario el montaje de muchos paneles para así cumplir con las condiciones de potencia requerida. Dado lo anterior, se busca extraer la mayor cantidad de energía del panel con el fin de reducir la cantidad de los mismos y aprovechar al máximo la producción de energía; esto puede ser logrado con una ubicación adecuada de los paneles, en donde reciban la mayor irradiancia del sol.

Actualmente la incursión de energías renovables y amigables con el medio ambiente, buscan aprovechar de la mejor manera la energía solar, principalmente por su fuente inagotable. Asimismo, se buscan equipos versátiles que permitan tanto determinar las curvas características de los paneles como medir las variables meteorológicas a las cuales estos se encuentran expuestos.

En este sentido, en este trabajo de grado se realiza un prototipo mejorado para la caracterización de paneles fotovoltaicos, el cual permite la medición de temperatura del panel, temperatura ambiente, humedad relativa, irradiancia y posición geográfica. Asimismo, el prototipo cuenta con una pantalla LCD (*Liquid Cristal Display*) táctil y un sistema de envío de datos, los cuales permiten una mejor interacción entre el usuario y el equipo, ofrecen la posibilidad de visualización de las mediciones y curvas características en tiempo real, además del envío de las mediciones a un servidor local. Con la integración de estas funcionalidades, se busca obtener una mejor caracterización del panel mediante la medición de las variables meteorológicas a las que se encuentra expuesto en el momento de la prueba y la inclusión de una interfaz amigable con el usuario que le permite un rápido acceso a la información registrada en la medición.

Esta tesis está estructurada por las siguientes secciones donde se explica su desarrollo. En la sección II se muestran las curvas características de los paneles fotovoltaicos, observando cómo cambia la corriente y la tensión en función de la irradiancia y la temperatura. En la sección III se describen los circuitos de sensado diseñados implementados (sensor de temperatura del panel y sensor de irradiancia). En la sección IV se explica el funcionamiento del prototipo y una breve descripción de los otros dispositivos que lo componen, además se describe el software desarrollado para la digitalización y visualización de las curvas características de los paneles y las demás variables sensadas. En la sección V se presenta el análisis de los resultados de implementación y simulación. Por último,

en las secciones VI y VII, se presentan las observaciones y conclusiones del trabajo realizado, además de la sección de anexos.

1. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Dependiendo del fabricante y del tipo de material fotovoltaico, los paneles fotovoltaicos presentan diferentes características de rendimiento y capacidades eléctricas. Además, los paneles son diseñados para soportar condiciones meteorológicas extremas. Un panel solar está compuesto por la conexión de varias celdas fotovoltaicas. Generalmente, las celdas son conectadas en serie a otras celdas para producir una tensión de funcionamiento entre los 12 y los 48 V. “Una célula solar está revestida con material anti-reflectante para limitar la reflexión de la luz en su superficie y absorber la máxima cantidad de radiación posible [4].

Cuando un módulo sin carga es expuesto al sol, la tensión medida en los terminales se denomina tensión de circuito abierto V_{oc} ; en esta situación, no hay circulación de corriente. De la misma manera, al realizar una conexión ideal entre sus terminales se puede medir la corriente de corto circuito I_{sc} . Cuando se conecta una carga al panel, se establecen los valores de operación de corriente y tensión entre los terminales. Variando la carga aplicada se obtienen nuevos puntos, que pueden ser ordenados en una línea denominada curva característica I-V (corriente vs tensión). El análisis de la curva I-V es de fundamental importancia en la caracterización de un generador fotovoltaico, pues a partir de ella es posible obtener los principales parámetros que determinan su calidad y desempeño [5]

Las curvas características de los módulos varían según las condiciones meteorológicas, la orientación, la inclinación y la ubicación geográfica del panel. Un ejemplo de esta variación se observa en la Imagen 1 y la Imagen 2 para diferentes valores de temperatura e irradiancia uniformes en el panel.

Imagen 1. Curva característica I-V con irradiancia constante para diferentes valores de temperatura

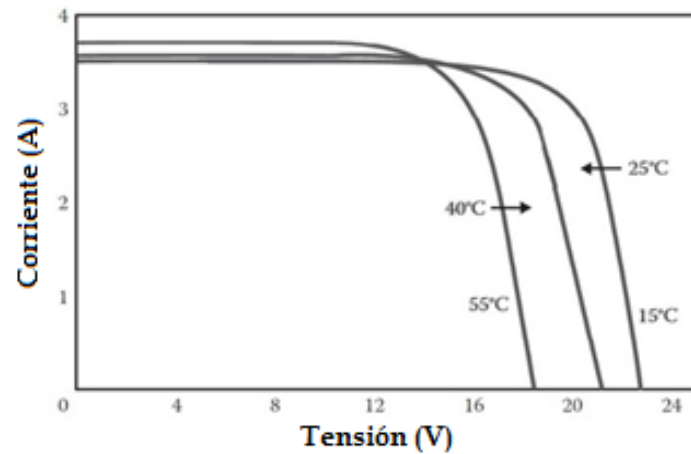
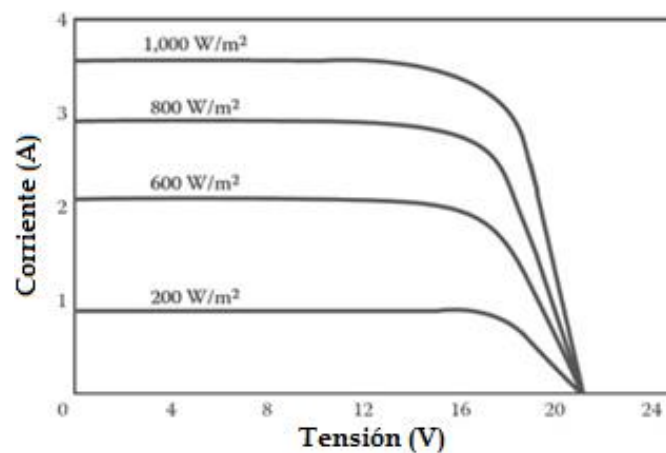


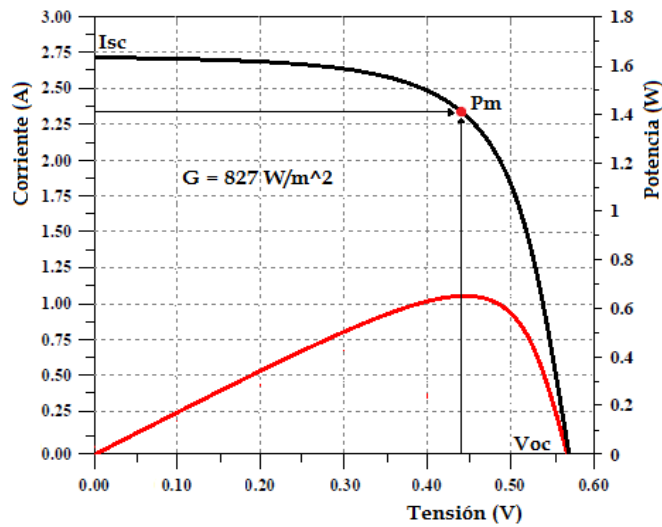
Imagen 2. Curva característica I-V con temperatura constante para diferentes valores de irradiancia



En la Imagen 3 se presenta un ejemplo de las curvas características I-V (corriente vs. tensión) y P-V (potencia vs. tensión) para niveles uniformes de irradiancia y temperatura en un panel fotovoltaico. Cada punto de la curva de potencia versus

tensión se interpreta como potencia generada para una determinada carga. En el módulo, existe un solo punto en el cual la potencia máxima (P_m) puede ser extraída (en la zona de la rodilla de la curva). Así, el punto de potencia máxima es el producto de la tensión de potencia máxima (V_{mp}) y la corriente de potencia máxima (I_{mp}).

Imagen 3. Curva característica I-V (línea negra) y P-V (línea roja)



La potencia nominal de los paneles fotovoltaicos está dada por la potencia pico que éste puede generar expresada en la unidad W_p (vatios pico), que se refiere a la potencia máxima generada bajo condiciones estándares de operación: temperatura e irradiancia uniformes a $25\text{ }^\circ\text{C}$ y 1000 W/m^2 respectivamente [5].

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS DE SENSADO DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS

En este trabajo se diseñaron e implementaron dos circuitos para el sensado de la temperatura del panel solar y de la irradiancia. A continuación, se presenta una descripción de los dispositivos implementados.

2.1 SENSOR DE TEMPERATURA DEL PANEL

El dispositivo utilizado para el sensado de la temperatura es diseñado considerando 2 RTD (*Resistance Temperature Detector*) tipo PT1000 y un circuito para el acondicionamiento de la señal.

Los RTD son sensores que permiten determinar la temperatura mediante la medición de la resistencia eléctrica del material, como por ejemplo el platino [6] [7].

El platino tiene un coeficiente de temperatura positivo, lo que significa que aumenta la resistencia eléctrica con la elevación de la temperatura, dando una respuesta aproximadamente lineal. Los sensores PTR (*Platinum Resistance Thermometers*) se caracterizan por su resistencia eléctrica específica R_0 a 0°C. Entre los tipos más comunes se encuentran las PT1000 con un R_0 de 1000 Ω [6] [7]

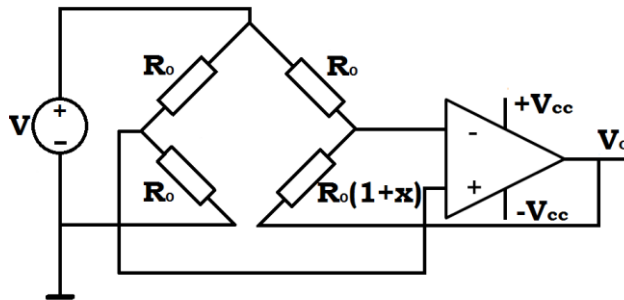
Se acopló al sensor de temperatura un cable de baja resistencia de 5 metros de largo con el fin de poder realizar medidas en paneles ubicados a esa distancia de la tarjeta de adquisición del prototipo. La calibración del sensor se realizó teniendo en cuenta la resistencia resultante del cableado.

La adecuación de la señal del sensor de temperatura se realizó mediante un puente de Wheatstone activo. Un puente de Wheatstone es un circuito eléctrico utilizado para medir una resistencia eléctrica desconocida mediante el equilibrio de las ramas, una de las ramas incluye el componente desconocido. El principal beneficio de un puente de Wheatstone es su capacidad de proporcionar mediciones precisas [8].

Dado que el puente pasivo de Wheatstone y el sensor (RTD) presentan una no linealidad inherente para ciertos rangos de temperatura, se hace uso del puente activo mostrado en la Imagen 4 que mejora la linealidad y la sensibilidad.

El circuito de adecuación de la señal cuenta con un integrado LTC-1051 que se caracteriza por tener bajo ruido, *zero drift* y una respuesta lineal; características idóneas para el uso en esta aplicación del sensado de temperatura [9].

Imagen 4. Puente de Wheatstone activo



La salida del puente activo está dada por:

$$V_o = -V \left(\frac{x}{2} \right) \quad (1)$$

Donde V es una tensión de polarización fija de 5 [V] y $R_o(1+x)$ es la resistencia eléctrica resultante de la RTD a la temperatura expuesta. La ecuación muestra que la tensión de salida es una función lineal de la variable de entrada x .

Dado que la señal de salida del puente (V_o) está en el orden de los milivoltios (mV) y es negativa, se coloca una configuración inversora (imagen 5) a la salida del puente activo con ganancia ajustable para que la tensión esté en el rango de medida que acepta la entrada analógica del convertidor analógico a digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*) del microcontrolador. La ganancia de la configuración inversora se ajusta de tal forma que la tensión máxima de entrada al ADC (4.5 [V]) se genere a una temperatura de 80 °C. Los componentes de la etapa de sensado de temperatura del panel se presentan en la tabla 1. (Ver Anexo 1)

Imagen 5. Circuito configuración inversora

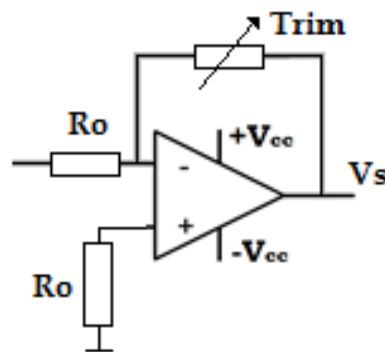


Tabla 1. Componentes de la etapa de sensado de temperatura

Elemento	Cantidad	Referencia o Valor
Integrado	2	LTC-1051
Resistencia R_o	5	1 k Ω
Trimmer	2	10 k Ω
RTD	2	PT1000

La salida que se obtiene del dispositivo de sensado (V_s) es muestreada por medio de una entrada del ADC del microcontrolador, el cual cuenta con una resolución de 10 bits y una tensión de referencia de 5 [V]. Una resistencia de 1000 Ω se

obtiene para una temperatura de 0 °C y alrededor de 1308 Ω para 80 °C, esto genera a la salida del inversor un cambio de 4.5 [V], por lo tanto, haciendo uso de 921 niveles del ADC, se obtiene una resolución de 0.087 °C.

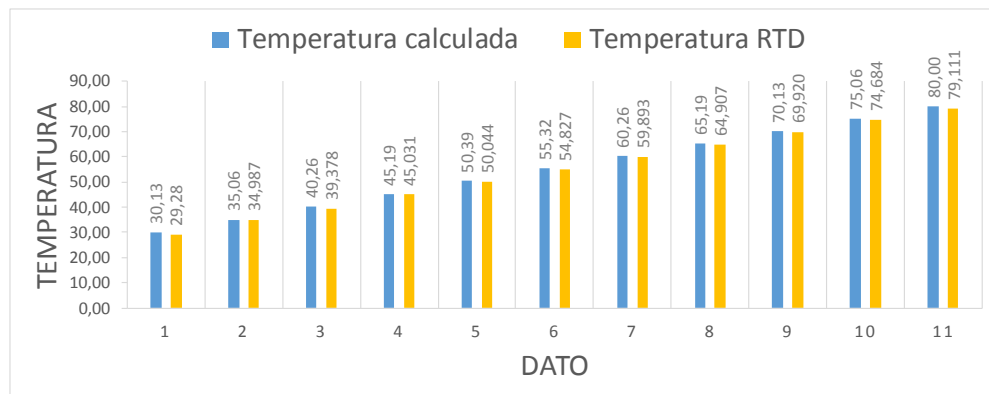
La comparación de los datos fue realizada mediante la aproximación lineal de la ecuación de Callendar-Van Dusen reducida (ecuación 2) [10].

$$R_{RTD} = R_0[1 + \alpha T(^{\circ}C)] \quad (2)$$

Con la ecuación 2 se calculó el valor de la temperatura ambiente midiendo el valor de la resistencia de la RTD (R_{RTD}) con el multímetro FLUKE 179 True RMS Digital Multimeter [11], de máxima resolución de 0.1 Ω . Se encuentra la tensión de salida para el valor de temperatura calculado, ajustando la ganancia del circuito de la configuración inversora.

En la siguiente imagen se observa la comparación de la temperatura calculada con la medición de la resistencia y la obtenida con la tensión de salida del circuito.

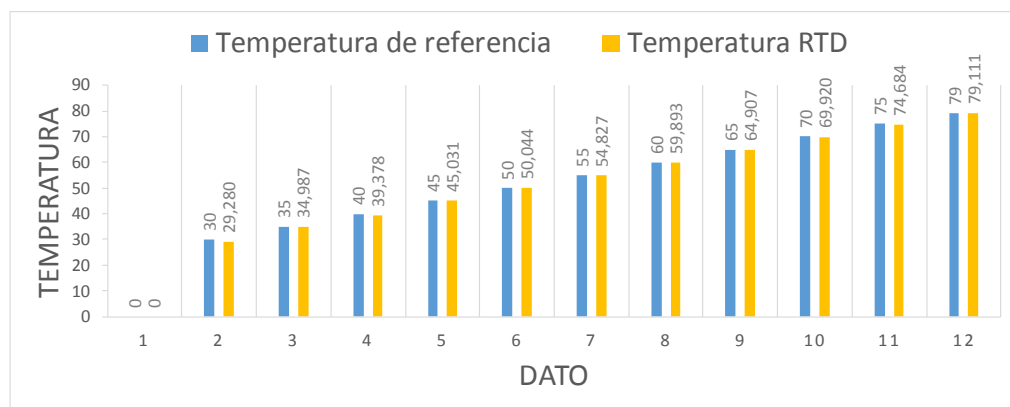
Imagen 6. Comparación de temperatura calculada por la medida de la resistencia de la RTD y la tensión de salida del circuito



En base al análisis anterior, se determinó un error promedio en la medición de la temperatura de 0.663%.

Ya con la ganancia ajustada del circuito de sensado se realizó la comparación mediante un baño termostático, con el dispositivo de temperatura controlada Heidolph Rotary Evaporators [12], obteniendo los resultados expuestos en la siguiente imagen.

Imagen 7. Comparación de temperatura medida para el Heidolph Rotary Evaporators y sensor RTD



2.2 SENSOR DE IRRADIANCIA

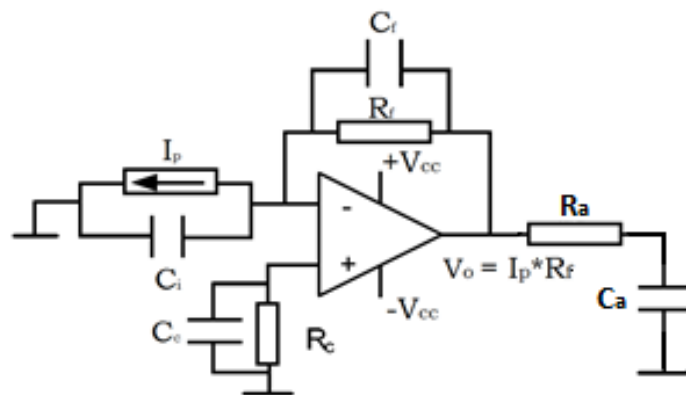
En la construcción del piranómetro (sensor de irradiancia) se utilizó un fotodiodo de referencia PIN OP913WSL de silicio. El fotodiodo tiene como respuesta una corriente que varía linealmente con la irradiancia, cuenta con una lente plana con un semi-ángulo de aceptación de 30° (área de gran tamaño que permite una detección de luz con niveles bajos) y presenta un ancho de banda espectral de 400 a 1170 nm con una sensibilidad pico en la longitud de onda de los 920 nm [13].

La energía transmitida por la radiación a un fotodiodo puede ser medida como una salida de corriente o tensión, sin embargo, la monitorización de corriente ofrece una mejor linealidad y mejor desempeño en el ancho de banda.

Los portadores libres creados en el fotodiodo por la radiación, generan fundamentalmente una señal de corriente. Debido a lo anterior es necesario adecuar la señal de corriente para que ésta pueda ser leída por el ADC del microcontrolador que tiene una lectura de tensión.

El amplificador de transimpedancia mostrado en la Imagen 8, convierte una señal de corriente a una de tensión. Este amplificador presenta una baja impedancia al fotodiodo y lo aísla de la tensión de salida del amplificador operacional de referencia LTC-1051.

Imagen 8. Amplificador de transimpedancia con modelo del fotodiodo y capacitores de compensación de ruido y fase



Para el diseño del circuito se calculan los valores de acuerdo a los requerimientos del sistema. En el cálculo de la resistencia de realimentación se tuvieron en cuenta varios aspectos: uno de ellos es la irradiancia máxima que incide sobre el fotodiodo OP913WSL, la cual es de 1600 W/m^2 que corresponde al punto máximo que se desea medir, este genera una corriente $I_l = 1600 \mu\text{A}$. El máximo valor de

tensión que puede recibir el convertidor Análogo-Digital es de 5 [V], por tanto, la resistencia calculada es de 3125 Ω .

Para mejorar la respuesta del coseno del ángulo cenital se utilizó un teflón que actúa como difusor. Este material disminuye considerablemente la intensidad de radiación que el fotodiodo recibe, debido a esto se ajustó experimentalmente el valor de la resistencia R_f de realimentación (ganancia del amplificador) a 10 k Ω .

En este caso se tiene muy en cuenta el error en DC producido por las corrientes de polarización del amplificador operacional, puesto que la ganancia es muy alta. Con el fin de minimizar el error se conecta una resistencia R_c en la entrada no inversora del OP AMP; debido a la naturaleza del resistor, este introduce un ruido el cual se amplifica. Para compensar este efecto se conecta en paralelo a R_c un capacitor C_c que acumula el ruido.

Para darle mayor estabilidad al sistema se compensa colocando un capacitor C_f (capacitor de compensación de fase) en paralelo a R_f , con el fin de agregar un cero al factor de realimentación del circuito, que contrarreste el polo producido por la capacitancia parasita C_i del fotodiodo. El valor del capacitor se calcula con la formula (3), tomada del libro Photodiode Amplifiers OP AMP Solutions [14]. Un filtro pasa-bajos está conectado a la salida del amplificador con una frecuencia de corte de 10 Hz para eliminar cualquier interferencia que pueda afectar el ADC [15]. (Ver Anexo 2)

$$C_f = (C_c/2)[1 + \sqrt{1 + 4C_i/C_c}] \quad (3)$$

En la tabla 2 se observa los componentes utilizados en el diseño del sensor de irradiancia, en la imagen 8 se observa el circuito.

Tabla 2. Componentes del circuito de sensado de irradiancia

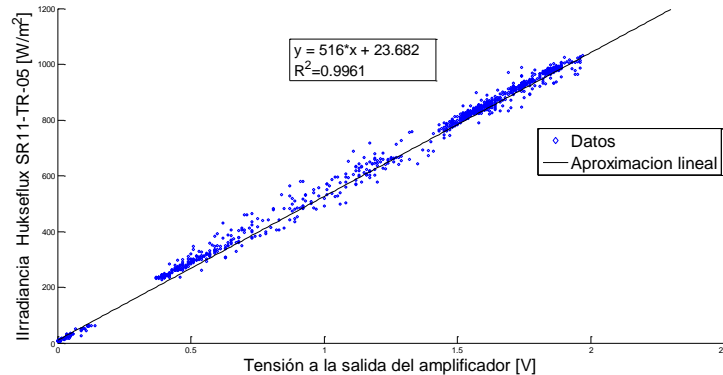
Elemento	Cantidad	Referencia o Valor
OP AMP	1	LTC-1051
Condensador cerámico	2	220 <i>pF</i>
Condensador cerámico	1	2.2 <i>nF</i>
Resistencia	1	10 k Ω
Resistencia	1	1 k Ω
Resistencia	1	6.8 k Ω
Fotodiodo	1	OP913WSL

Los datos para la comparación del pirómetro se tomaron los días 3 y 4 de abril de 2017 en el techo verde la E3T del 5 piso, en los cuales se evidenciaron unas condiciones meteorológicas adecuadas, es decir cielo despejado de nubosidad. Se comparó la tensión entregada por el dispositivo de adecuación de la señal del fotodiodo con la irradiancia entregada por un piranómetro de primera clase estandarizado por la ISO 9060, calibrado según el procedimiento ISO 9847 (Hukseflux SR11-TR-05) [16].

Se tomaron datos de la tensión obtenida con el sensor de irradiancia implementado y los datos correspondientes de irradiancia utilizando el piranómetro de Hukseflux (ver

Imagen 9).

Imagen 9. Datos para obtener el factor de calibración



Partiendo de la imagen anterior se calcula el factor de calibración “ $k = 516$ ”, el cual es necesario para obtener el valor real de la irradiancia en el procesado de datos que se realiza en el microcontrolador.

La salida del piranómetro implementado varía entre 0 y 3 V para unos niveles de irradiancia de 0 y 1600 W/m^2 , respectivamente. De esta manera, se obtiene una resolución de 2.61 W/m^2 .

2.3 FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE SENSADO IMPLEMENTADOS

Para evitar las variaciones de tensión y el ruido que genera la fuente en los dispositivos de sensado implementados, se hace uso de reguladores de tensión (LM7805, LM7905) [17], con capacitores a la entrada y la salida, obteniendo valores de polarización para los circuitos de 5 [V] y -5 [V] . Los componentes de la fuente de alimentación se presentan en la tabla 3.

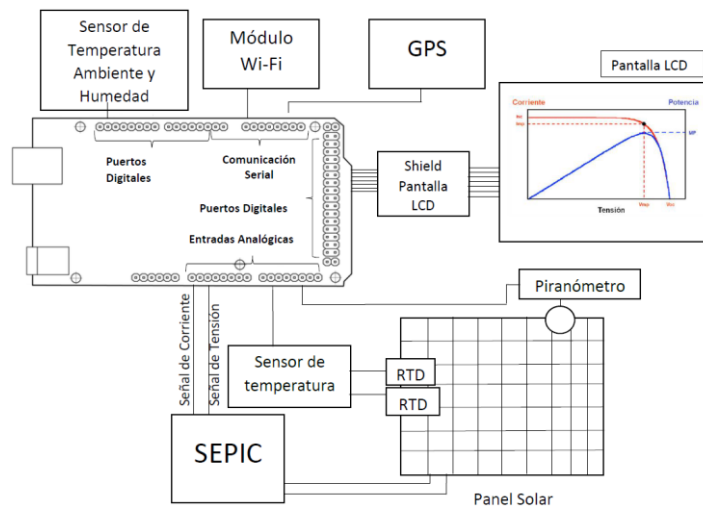
Tabla 3. Componentes del circuito regulador de tensión

Elemento	Cantidad	Referencia o Valor
Regulador de 5 [V]	1	LM7805
Regulador de -5 [V]	1	LM7905
Condensador electrolítico	2	0.33 μF
Condensador electrolítico	2	0.1 μF

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El prototipo está dividido en 7 secciones: Sensor de irradiancia, sensor de temperatura del panel, sensor de temperatura ambiente y humedad, sensado de tensión y corriente mediante el prototipo del DC/DC SEPIC [18], GPS para conocer la ubicación de la toma de datos, Wi-Fi para enviar los datos a un servidor local y finalmente la visualización de datos y variables obtenidas por los dispositivos de sensado. A continuación, se presenta un esquema del prototipo y posteriormente se analiza cada una de las etapas.

Imagen 10. Esquema del Prototipo



3.1 SENSOR DE TEMPERATURA DEL PANEL.

El sensor es implementado con 2 detectores de temperatura resistiva RTD (PT1000) y un puente de Wheatstone activo, tal como se presentó en la sección anterior, obteniendo a la salida una señal de tensión que es leída por la tarjeta de Arduino. Se utilizan las RTD debido a su precisión, repetibilidad y estabilidad en la medida.

En la siguiente figura se observa la RTD utilizada para el diseño e implementación del sensor de temperatura.

Imagen 11. PT1000, sensor de temperatura



Fuente: BEIJING HYXC TECHNOLOGY CO, LTDA, «<https://es.aliexpress.com/>,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/PT1000-temperature-sensor-two-wire-wire-length-2-meters>

La medición de la temperatura del panel es importante en el proceso de caracterización de paneles solares debido a que ésta altera el comportamiento de los parámetros de las celdas durante la generación de energía eléctrica. Las variables principalmente afectadas son la tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la tensión en el punto de máxima potencia.

3.2 SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE Y HUMEDAD

Módulo sensor de referencia AM2305 con salida digital (ver Imagen 12) [20], utilizado para medir la temperatura ambiente y humedad donde se encuentra instalado el panel fotovoltaico. Esta medición de temperatura ambiente puede ser utilizada para determinar la temperatura aproximada del panel.

El piranómetro se puede utilizar en las mediciones de radiación solar en el campo de las energías renovables por su precisión y bajo costo, ya que en el mercado se encuentran estos dispositivos, pero a precios elevados.

Imagen 13. Piranómetro

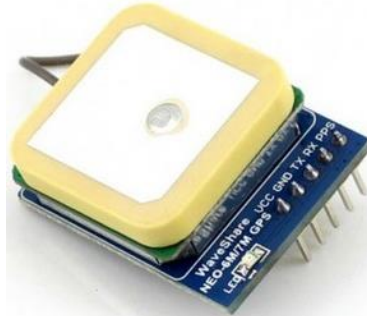


Se seleccionan todos los componentes del piranómetro por su disponibilidad y costo en el mercado, los cuales son apropiados y cumplen los requisitos para esta aplicación.

3.4 GLOBAL POSITION SYSTEM (GPS)

Se utiliza el GPS de referencia NEO-7M para conocer la posición geográfica de la toma de datos del prototipo (ver Imagen 14). El GPS se basa en la determinación simultánea de las distancias a cuatro satélites (como mínimo) de coordenadas conocidas. Estas distancias se obtienen a partir de las señales emitidas por los satélites, las que son recibidas por receptores especialmente diseñados [21]. El GPS se compone de tres elementos: los satélites en órbita alrededor de la Tierra, las estaciones terrestres de seguimiento y control, y los receptores del GPS propiedad de los usuarios [22].

Imagen 14. GPS NEO-7M



Fuente: WAVESHARE share awesome hardware, «Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/gps/m%C3%B3dulo-uart-gps-neo-7m-c-b-ws-uart-gps-neo-7m-c-b-detail>.

Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS; ellos, a su vez, proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora [22].

3.5 MÓDULO WIFI

El módulo WiFi Serial ESP-07 (ver Imagen 15) es utilizado para el envío de datos a un servidor local, con el fin de tener acceso a los datos obtenidos por los sensores y las curvas características.

Imagen 15. Módulo WiFi Serial ESP-07



Fuente: «Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/wifi/m%C3%B3dulo-wifi-serial-esp-07-detail>.

Este módulo incluye todo lo necesario para conectarse a un punto de acceso WiFi mediante comandos de texto AT, vía una puerta serie, que puede ser configurada a diferentes velocidades. Una vez que se programa para conectarse a la red WiFi, el módulo es capaz de enviar información que se remite vía la puerta serie a una dirección IP y puerto deseado [25].

3.6 TARJETA ARDUINO

Se utiliza la tarjeta Arduino mega (ver Imagen 16) basada en el Atmega 2560 para el control del prototipo (convertidor SEPIC), adquisición de las medidas sensadas, control de la pantalla LCD y envío de la información. Esta tarjeta 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 [26].

Para el manejo del Arduino se requiere la instalación del software de compilación IDE ARDUINO.

Imagen 16. Arduino MEGA 2560



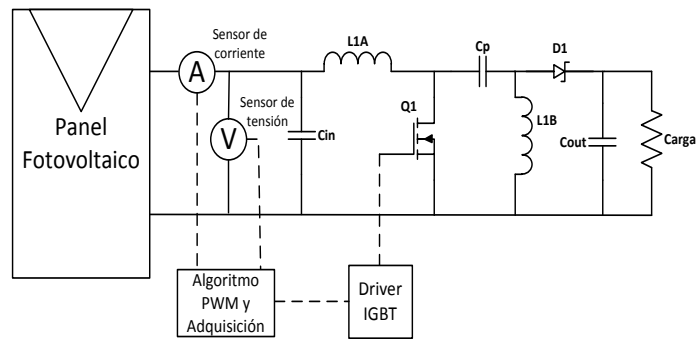
Fuente: Arduino, «ARDUINO,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>.

3.7 SEÑAL DE CORRIENTE Y TENSION DEL PANEL

La señal de corriente y tensión es obtenida del “prototipo para la caracterización de paneles fotovoltaicos” del grupo GISEL [18].

En la implementación del prototipo es utilizado un convertidor DC/DC SEPIC que emula una resistencia variable a la salida del panel, mediante un barrido del ciclo de trabajo. La corriente y la tensión entregada por el panel son sensadas mediante los dispositivos con referencias LA25 Y LV25 de LEM respectivamente [27] [28]. Estos sensores son ajustados para realizar mediciones de tensión de hasta 60 V y de corriente de hasta 12 A. Las señales de salida de los sensores son adecuadas a valores de tensión entre 0V y 5V, las cuales son leídas mediante el puerto Analógico/ Digital.

Imagen 17. Esquema del prototipo "Implementación de un Prototipo para la Caracterización de Paneles Fotovoltaicos"



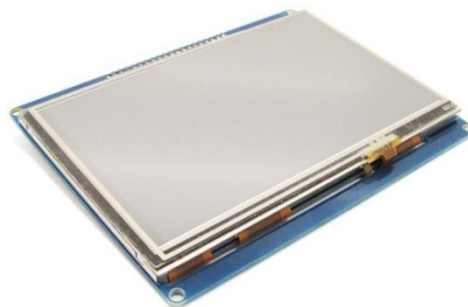
Fuente: J. J. Chacón Avendaño y R. A. Ortiz Jurado, «Implementación de un prototipo para la caracterización de Paneles Fotovoltaicos,» Bucaramanga, 2016

3.8 VISUALIZACIÓN DE DATOS Y VARIABLES

En esta sección se aborda la parte de visualización de los datos obtenidos mediante la etapa de sensado y la realización de las curvas características.

Se utiliza un módulo de visualización ITDB02-5.0 presentado en la Imagen 18, que es una TFT LCD (*Thin Film Transistor - Liquid Crystal Display*, Pantalla de cristal líquido de transistores de película fina) de 5 pulgadas, la cual soporta una interfaz de datos de 16 bits con interfaz de control de 4 cables. El control se realiza por medio de los puertos digitales del Arduino Mega 2560. Además, la pantalla es táctil y tiene un socket para tarjeta SD donde se guardan los datos tomados de la caracterización.

Imagen 18. Pantalla LCD



Fuente: ITEAD, «Itead,» [En línea]. Available: <https://www.itead.cc/itdb02-5-0.html>.

El módulo LCD funciona con una tensión de 3.3V y no es compatible con los puertos del arduino MEGA, por lo que se hace uso de una shield starterd kid para 3.3V-5V placa que hace la interfaz entre los pines del arduino MEGA y los pines del módulo, tal como se muestra en la Imagen 19.

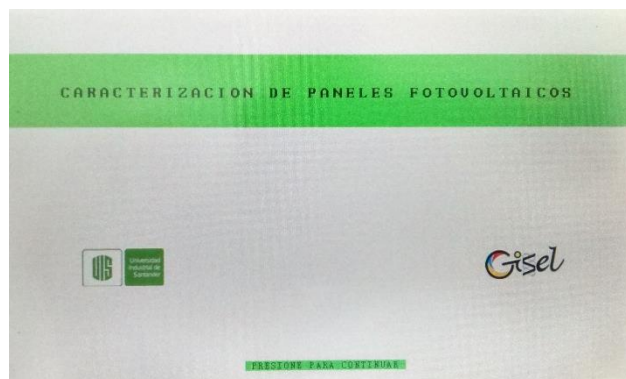
Imagen 19. Shield starterd kid para pantalla LCD



Fuente: ITEAD, «Itead,» [En línea]. Available: <https://www.itead.cc/itdb02-arduino-mega-shield.html>.

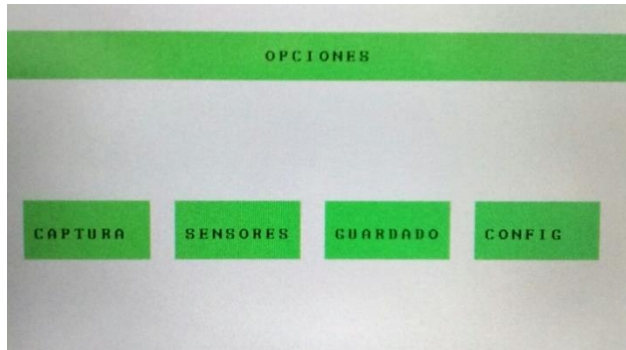
En la siguiente imagen se presenta la pantalla de inicialización del prototipo.

Imagen 20. Pantalla de inicio del prototipo



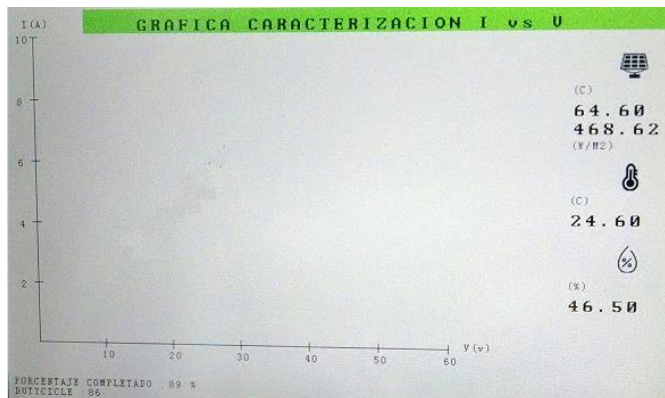
La interfaz del prototipo muestra varias opciones en el menú principal (ver Imagen 21). Estas opciones ofrecen al usuario un fácil acceso a las variables sensadas y a los datos obtenidos mediante la caracterización.

Imagen 21. Menú de opciones (captura, sensores, guardado, configuración)



La opción “CAPTURA”, permite realizar la caracterización de los paneles, graficar en tiempo real la curva característica I-V, muestra el valor de la irradiancia, temperatura del panel, temperatura ambiente y humedad, condiciones a las que está expuesto el panel en el momento de la caracterización, como se observa en la siguiente imagen.

Imagen 22. Interfaz de caracterización del prototipo



Al finalizar la caracterización, el prototipo tiene la opción de guardar los datos si el usuario así lo requiere.

En la opción “SENSORES” (Imagen 23) se visualizan los datos obtenidos del sensado (temperatura del panel, irradiancia, temperatura ambiente, humedad

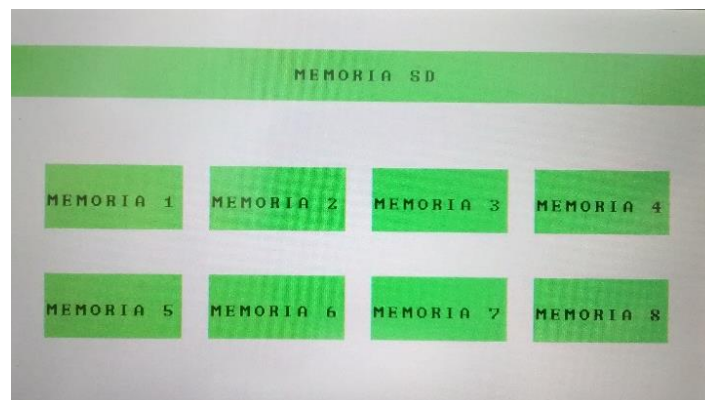
relativa), la posición geográfica, la hora y la fecha. Esta opción me permite tener un acceso fácil y rápido a todos los datos del prototipo en tiempo real.

Imagen 23. Visualización de las variables sensadas



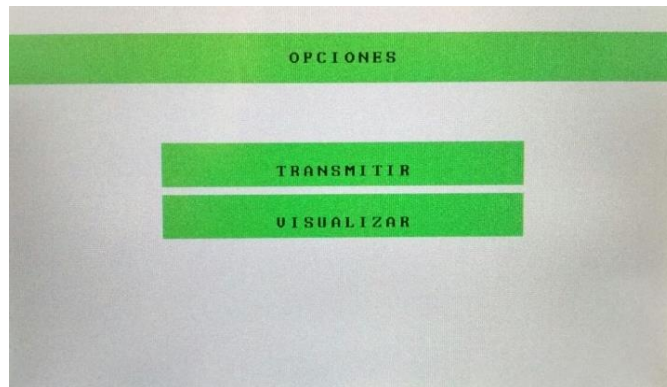
En la opción "GUARDADO" del prototipo se pueden visualizar las curvas características obtenidas o enviar los datos obtenidos durante la caracterización. En "GUARDADO" se pueden almacenar hasta 8 caracterizaciones, el almacenamiento se realiza en la memoria SD de la pantalla.

Imagen 24. Opciones de memoria



Cada opción de “Memoria” tiene la posibilidad de “TRANSMITIR” o “VISUALIZAR” los datos, ver la siguiente imagen.

Imagen 25. Menú con opciones de "TRANSMITIR" o "VISUALIZAR"



En las siguientes imágenes, mediante la opción “VISUALIZAR”, se observan algunas gráficas de las curvas características guardadas en el prototipo. Mediante las opciones IV (Corriente vs Tensión) y PV (Potencia vs Tensión) en la parte derecha de la pantalla, se puede visualizar la curva que el usuario requiera.

Imagen 26. Curva característica Potencia vs Tensión obtenida por el prototipo

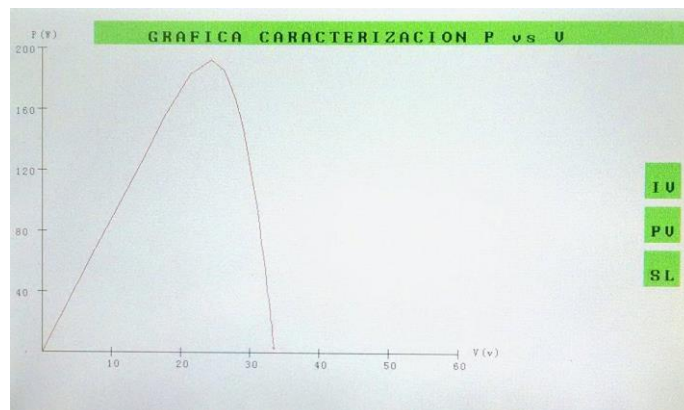
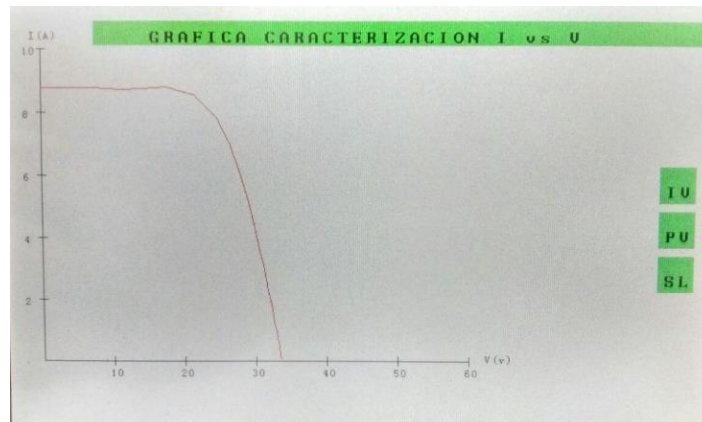
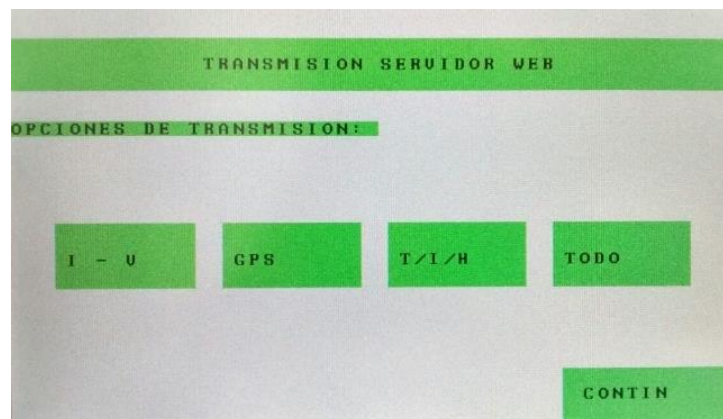


Imagen 27. Curva característica Corriente vs Tensión obtenida por el prototipo



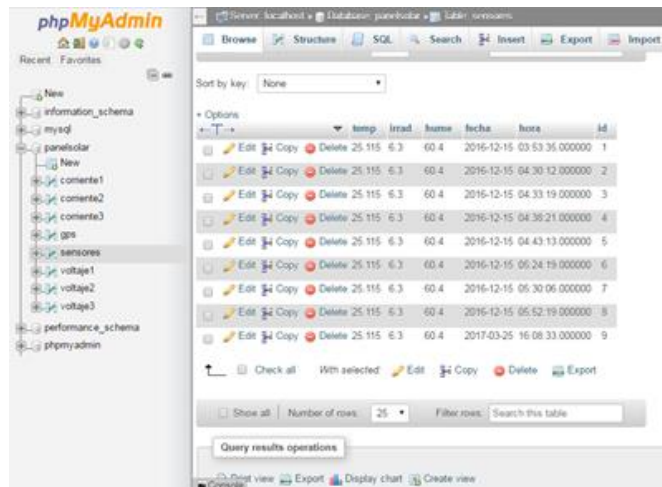
El envío de los datos al servidor se hace con la opción “TRANSMITIR” (ver Imagen 25). Esta opción envía los datos de tensión, corriente, irradiancia o temperatura ambiente, además de la posición geográfica donde se hizo la caracterización, como se observa en la siguiente imagen.

Imagen 28. Opciones para enviar los datos



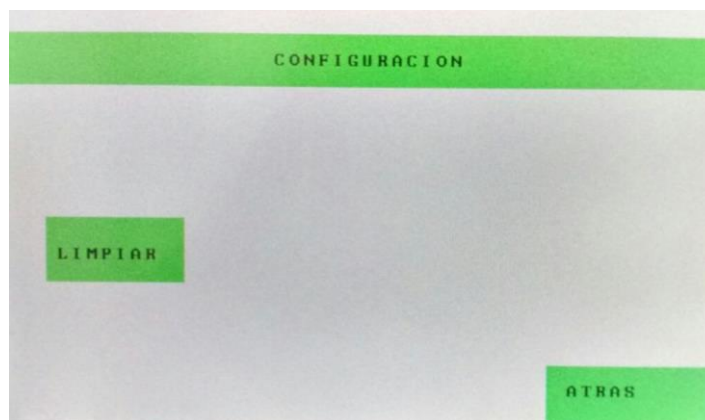
Un ejemplo de los datos recibidos en el servidor se observa en la siguiente imagen.

Imagen 29. Servidor de prueba



Por otro lado, la interfaz del prototipo cuenta con la opción de “CONFIG”, esta opción limpia o borra los datos guardados en el prototipo, como se puede ver en la siguiente imagen.

Imagen 30. Menú de configuración



4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de simulación realizados en el software PSIM y los resultados experimentales obtenidos en el prototipo.

En la Imagen 17 se observa la topología utilizada en el proyecto de grado “Implementación de un prototipo para la caracterización de Paneles Fotovoltaicos” [18], donde utilizan un convertidor SEPIC conectado a un panel solar.

De acuerdo al funcionamiento del circuito en el esquema de la imagen 14, el prototipo emula una resistencia variable a la salida del panel, mediante un barrido en su 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 el rango de tensiones y corrientes que puede generar el panel. 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 obtener las curvas características [18], además de esto con la inclusión de los sensores de temperatura e irradiancia se obtienen las curvas características a las condiciones de operación que está expuesto el panel.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la siguiente imagen se observa el prototipo implementado en este proyecto de grado.

Imagen 31. Prototipo para la caracterización de paneles fotovoltaicos



En las pruebas experimentales la conmutación del IGBT del prototipo [18], se realiza mediante una salida PWM (pin 11) obtenida del Arduino Mega 2560.

Las pruebas fueron realizadas en el techo verde del 5 piso en la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Estas pruebas se realizaron considerando un panel de Trina Solar TSM-255PC05A de $255 W_P$ [31] y un panel de Synthesis Power SP50M de $50 W_P$ [32].

4.1.1 Resultados para el Panel Trinasolar de 255w. En la Imagen 32 y en la Imagen 33 se observan las curvas características obtenidas experimentalmente a una irradiancia uniforme de 1072 W/m^2 , con temperatura en el panel de $60.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura ambiente de $32 \text{ }^\circ\text{C}$.

Imagen 32. Curva característica experimental de Corriente vs Tensión panel Trina Solar de 255 W

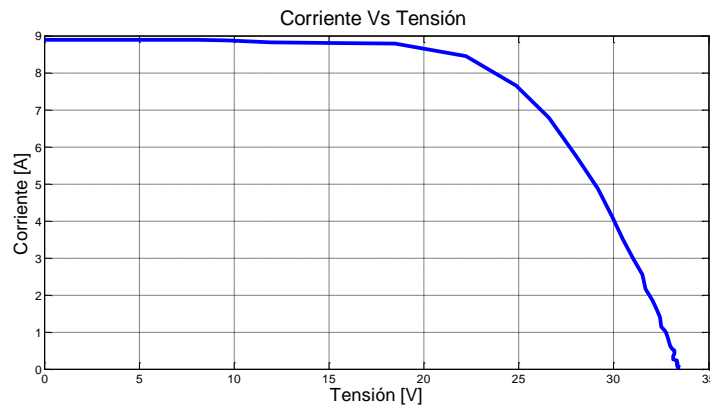
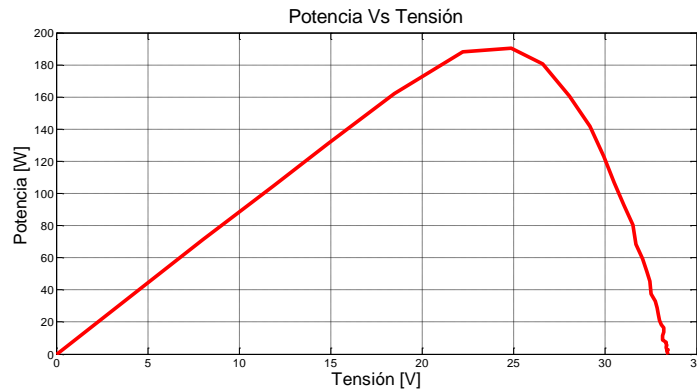


Imagen 33. Curva característica experimental de Potencia vs Tensión panel Trina Solar de 255 W



En la caracterización se observa una corriente de corto circuito $I_{sc} = 8.89 \text{ [A]}$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 33.37 \text{ [V]}$, obteniendo una potencia máxima de $P_{m\acute{a}x} = 190.48 \text{ [W]}$.

4.1.2 Resultados para el Panel Synthesis Power de 50w. Para el panel de 50 W se obtienen las siguientes curvas características a una irradiancia de 1101 W/m^2 , con temperatura en el panel de $45 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura ambiente de $28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Imagen 34. Curva característica experimental de Corriente vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W

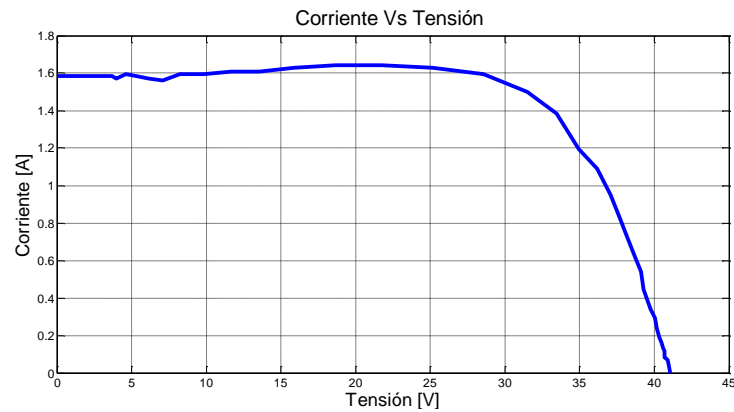
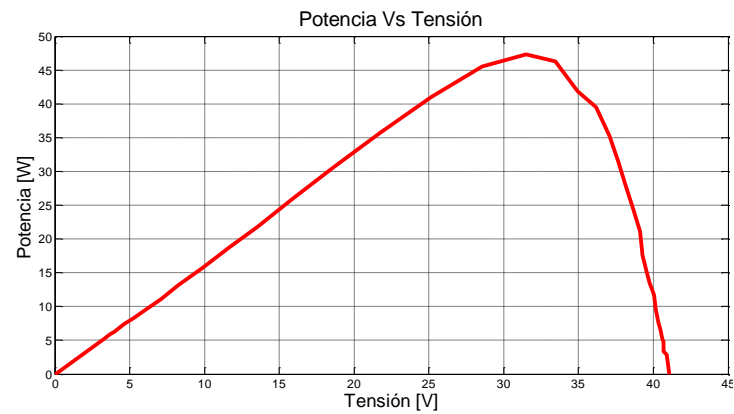


Imagen 35. Curva característica experimental de Potencia vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W



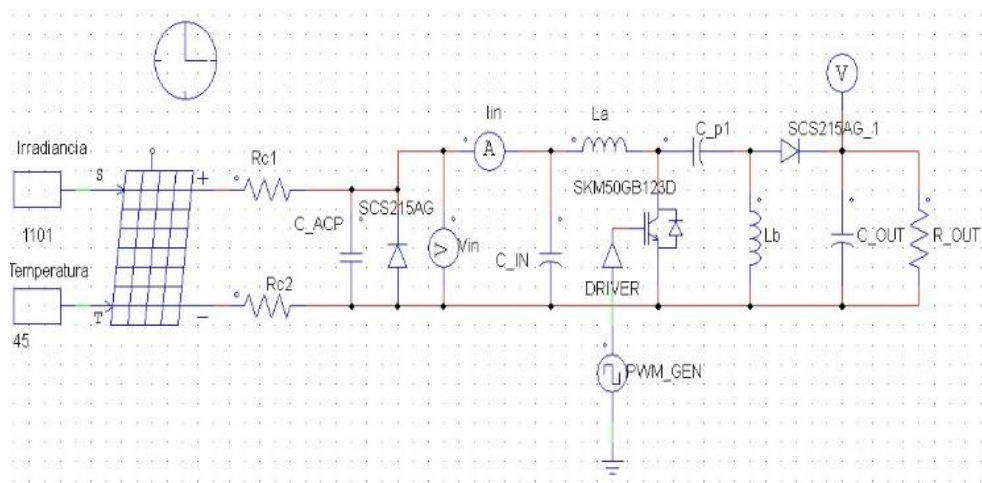
En las curvas características se observa una corriente de corto circuito $I_{sc} = 1.58 [A]$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 40.99 [V]$, obteniendo una potencia máxima de $P_{m\acute{a}x} = 47.28 [W]$.

Como se observa en los resultados experimentales, las curvas obtenidas cumplen con lo esperado, el prototipo es eficiente en la realización de las curvas características llegando a valores cercanos que presentan la hoja de datos.

4.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La simulación se realizó mediante al circuito propuesto en el proyecto de grado “Implementación de un Prototipo para la Caracterización de Paneles Fotovoltaicos” [18].

Imagen 36. Esquema de simulación del prototipo en PSIM



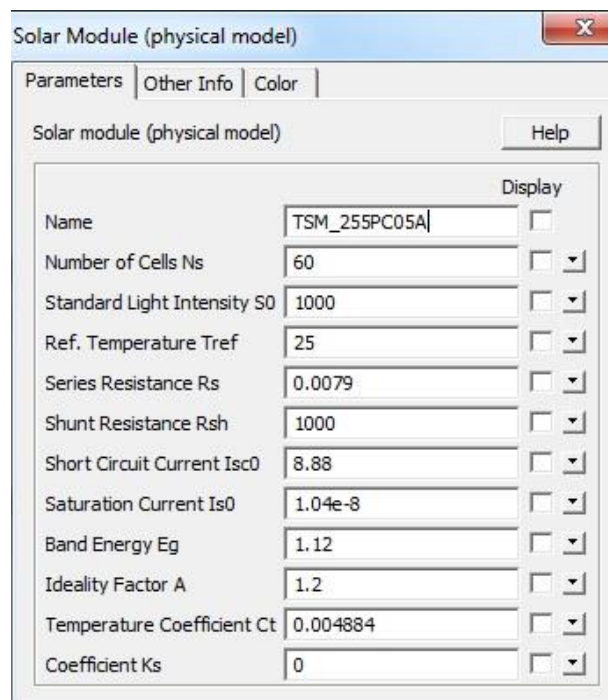
La señal de conmutación para el IGBT del prototipo [18], se realiza con un generador de onda cuadrada a una frecuencia de 20[kHz].

El modelo físico del panel en el software PSIM se obtiene de los parámetros dados por el fabricante en la hoja de datos del panel.

Partiendo del modelo físico del panel se procede a generar las curvas características. Estas curvas se realizan al mismo valor de temperatura e irradiancia que arrojó el prototipo en las pruebas experimentales y con el mismo cambio en el ciclo de trabajo que realiza el mismo.

4.2.1 Resultados para el Panel Trina Solar de 255 W. El modelo físico del panel Trina Solar de 255 W obtenido en PSIM es el siguiente.

Imagen 37. Parámetros de simulación del panel solar de 255 W



La simulación se realiza en 38 pasos, variando el ciclo de trabajo desde el 20% hasta el 94%, arrojando las siguientes curvas características:

Imagen 38. Curva característica simulada de Corriente vs Tensión panel Trina Solar de 255 W

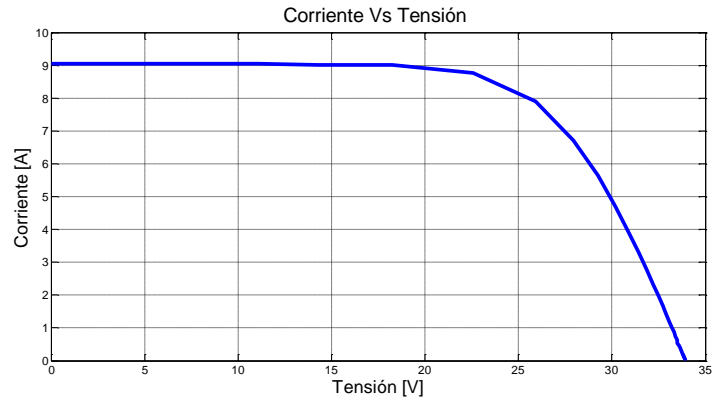
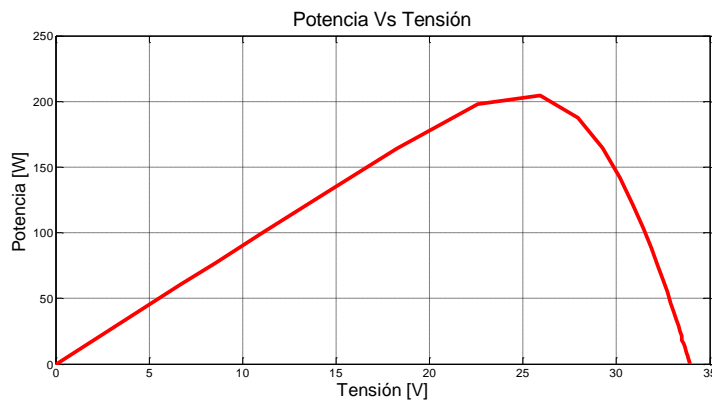


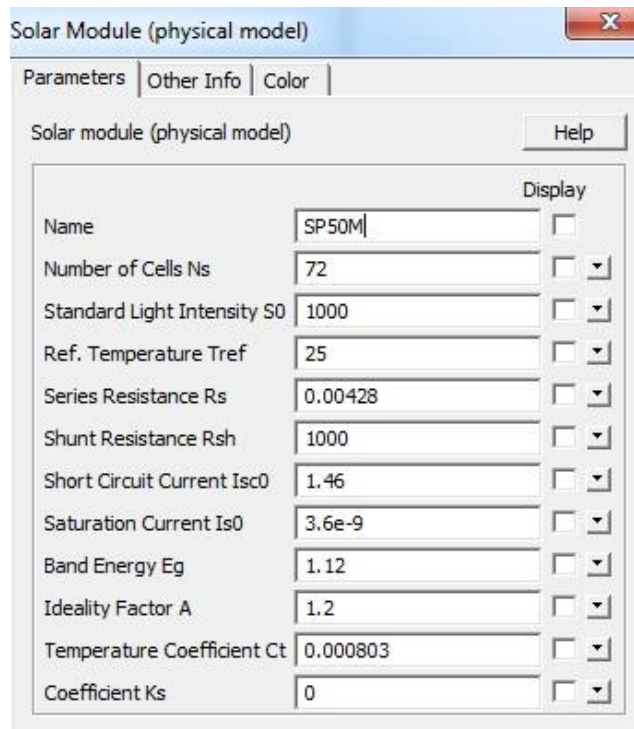
Imagen 39. Curva característica simulada de Potencia vs Tensión panel Trina Solar de 255 W



Las curvas características obtenidas dan como resultado una corriente de corto circuito $I_{sc} = 9.04 [A]$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 33.94 [V]$, obteniendo una potencia máxima de $P_{m\acute{a}x} = 204.69 [W]$.

4.2.2 Panel Synthesis Power de 50 W. Para la simulación del panel de 50 W, se hace el barrido del ciclo de trabajo igual que en la anterior simulación, según la hoja de datos del panel se obtiene el modelo físico en PSIM según la siguiente imagen.

Imagen 40. Parámetros de simulación del panel solar de 50 W



Los resultados de simulación para el panel de 50W se presentan en las siguientes gráficas.

Imagen 41. Curva característica simulada de Corriente vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W

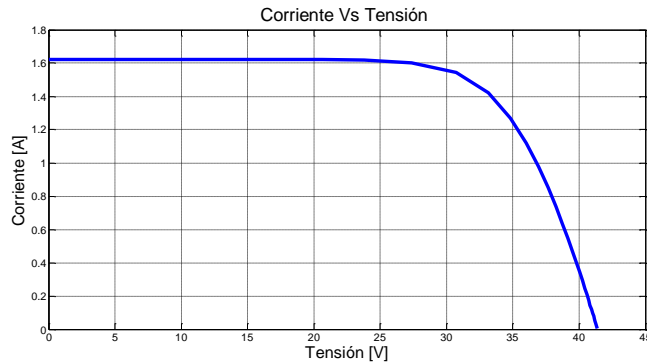
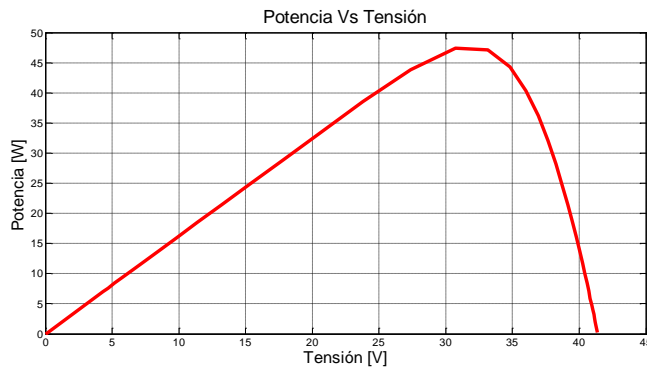


Imagen 42. Curva característica simulada de Potencia vs Tensión panel Synthesis Power de 50 W



En la simulación las curvas características obtenidas dan como resultado: corriente de corto circuito $I_{sc} = 1.623 [A]$, tensión de circuito abierto $V_{oc} = 41.37 [V]$ y potencia máxima de $P_{m\acute{a}x} = 47.37 [W]$.

4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para constatar los datos experimentales se hace una comparación con los datos obtenidos en la simulación, analizando el error que se produce en la corriente de corto, tensión de circuito abierto y máxima potencia.

4.3.1 Panel Trina Solar de 255 W. En las siguientes graficas se observa que las curvas características I-V y P-V realizadas por el prototipo implementado, siguen la forma de las curvas obtenidas en simulación. Sin embargo, los resultados experimentales tienen una pequeña diferencia con respecto a los resultados de simulación principalmente alrededor del punto de máxima potencia. Lo anterior puede deberse al modelo de simulación de PSIM.

Imagen 43. Comparación de curvas características Corriente vs Tensión del panel Trina Solar de 255 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja)

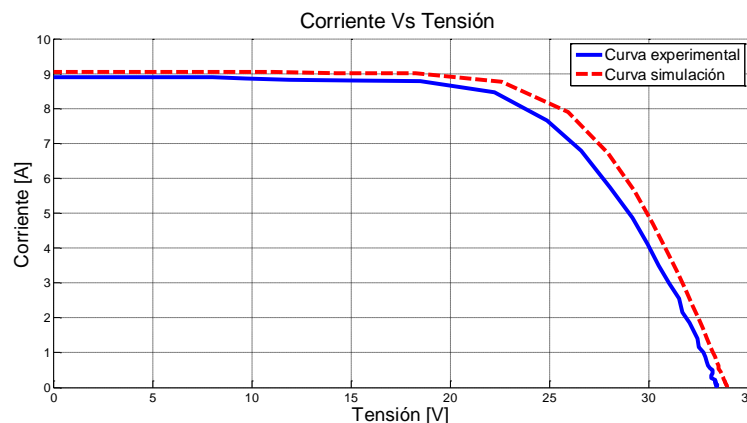
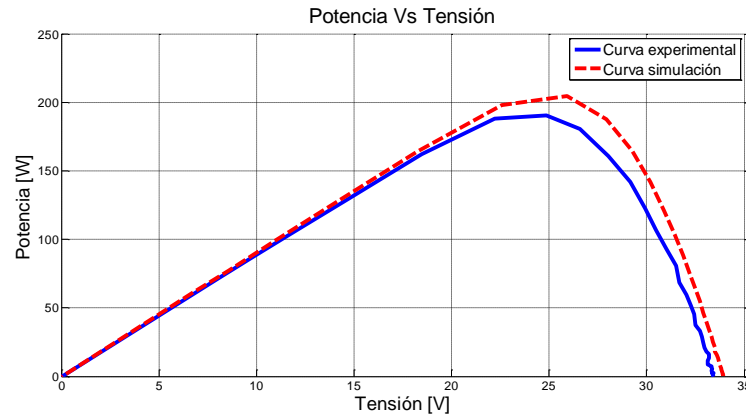


Imagen 44. Comparación de curvas características Potencia vs Tensión del panel Trina Solar de 255 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja)



4.3.2 Panel Synthesis Power 50 W. En la Imagen 42 y la Imagen 43 se observa la comparación de los resultados experimentales y de simulación para el panel de 50 W. Tal como se observa la caracterización del prototipo es muy cercana a la obtenida en simulación, verificando el correcto desempeño del prototipo.

Imagen 45. Comparación de curvas características Corriente vs Tensión del panel Synthesis Power de 50 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja)

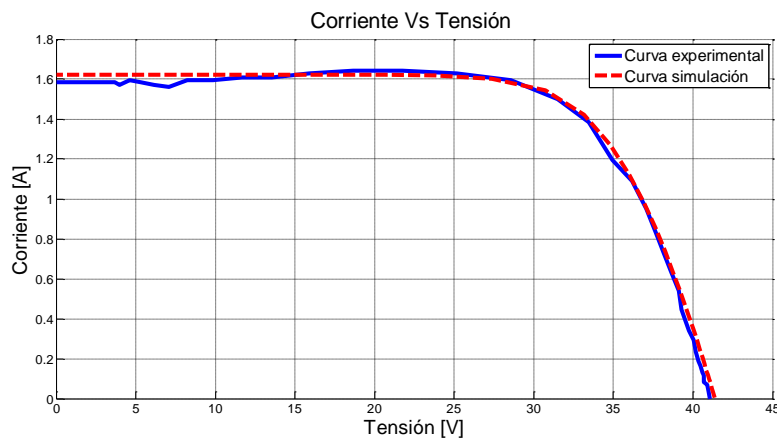
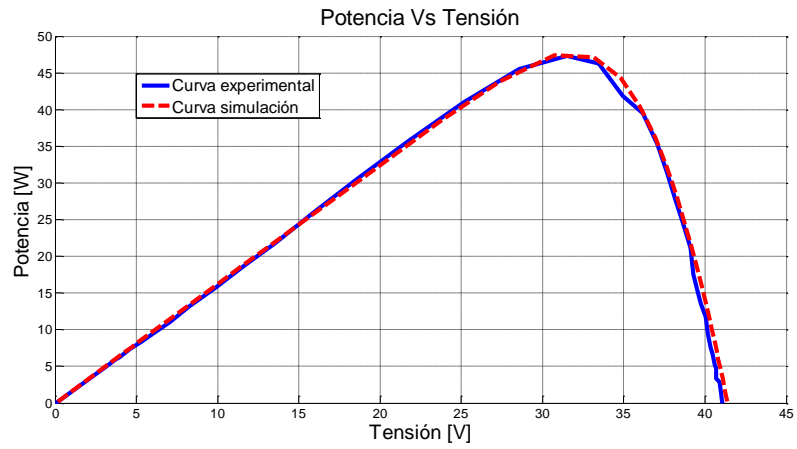


Imagen 46. Comparación de curvas características Potencia vs Tensión del panel Synthesis Power de 50 W, curva experimental (línea azul) curva en simulación (línea roja)



5. OBSERVACIONES

Durante la ejecución del proyecto se resaltan las siguientes observaciones:

Con las curvas características obtenidas mediante el prototipo es posible calcular los parámetros necesarios para el modelado circuital del panel fotovoltaico, de acuerdo a las condiciones meteorológicas a las cuales operará típicamente el panel. Para trabajos futuros se pueden implementar algoritmos que logren obtener estos modelos.

En las imágenes 42 y 43 se observa que la curva experimental tiene una pequeña diferencia respecto a la obtenida mediante simulaciones. Esta diferencia se puede deber a diferentes factores como: posibles sombras en el panel solar, posibles pérdidas en los conductores, desgaste del panel solar debido a su vida útil, entre otros. Estos factores no se tienen en cuenta en el software de simulación.

Para mejorar la exactitud del piranómetro se puede incluir un sensor de temperatura dentro del módulo de sensado de irradiancia junto a un sistema de ajuste del valor medido, ya que las respuestas de los diferentes elementos utilizados para el montaje de este instrumento pueden variar cuando varía la temperatura, principalmente debido a sus características de linealidad.

En trabajos futuros se puede considerar el mejoramiento de la estructura del prototipo y diseño del convertidor SEPIC, de tal forma que sea de mejor y fácil portabilidad por parte del usuario.

En trabajos futuros también se puede contemplar la ampliación de etapa de potencia de tal manera que el prototipo se pueda utilizar para la caracterización de arreglos de paneles solares en conexión serie-paralelo.

6. CONCLUSIONES

Como resultado final del proyecto, se presenta el prototipo para la caracterización de paneles fotovoltaicos, el cual permite: el sensado de las variables meteorológicas que afectan las características eléctricas de los paneles, la visualización de los datos en tiempo real, el envío de los datos realizado por medio del módulo Wifi, además de esto el prototipo mejora la interacción con el usuario mediante la pantalla táctil. Con este prototipo no es necesario contar con un equipo de cómputo al lado para poder obtener las curvas características, sino que éstas pueden ser almacenadas en campo y después descargadas al computador para un posterior procesamiento de los datos.

En base a las pruebas realizadas, se concluye que, con el sensado de las variables meteorológicas, el cual se hace directamente en el panel y en el lugar en donde éste se encuentra ubicado, se mejora la información obtenida en el proceso de caracterización del panel, ya que esto ofrece datos reales de operación.

Cuando se requiere diseñar e implementar una instalación fotovoltaica es necesario analizar las curvas características I-V y P-V de los paneles a utilizar. Con el prototipo implementado se logra conocer las características de funcionamiento del panel en el sitio, esto con el fin de escoger el mejor lugar y mejorar el diseño de la instalación para lograr buenos rendimientos del sistema fotovoltaico.

En términos generales se puede afirmar que las curvas experimentales, contrastadas con las curvas de simulación, representan al prototipo implementado con buena aproximación, permitiendo conocer el funcionamiento del panel bajo cualquier condición meteorológica que se encuentre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REN21, «RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT,» *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, pp. 28-42, 2016.
- [2] The Eco Experts, «The Eco Experts,» [En línea]. Available: <http://www.theecoexperts.co.uk/which-solar-panels-are-most-efficient>. [Último acceso: 2017].
- [3] . V. AGGARWAL, «energysage,» 8 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.energysage.com/>.
- [4] R. Pode y B. Diouf, *Solar Lighting (Green Energy and Technology)*, Seoul: Springer, 2011.
- [5] L. H. Vera, «Programa Computacional para Dimensionamiento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos,» Porto Alegre, 2004.
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS, «National Instruments,» 5 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/7115/es/>. [Último acceso: 2017].
- [7] FLUKE, «Fluke calibration,» [En línea]. Available: <http://la.flukecal.com/>. [Último acceso: 2017].
- [8] NASA y N. Hall, «National Aeronautics and Space Administration,» [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunwheat.html>. [Último acceso: 2016].
- [9] LINEAR, «LINEAR TECHNOLOGY,» Datasheet, [En línea]. Available: <http://www.linear.com/product/LTC1051>. [Último acceso: 2016].
- [10] I. Moreno Velasco, «SENSORES RESISTIVOS,» de *Apuntes de Instrumentación Electrónica (ver. 5.5.)*, pp. 23-24.
- [11] FLUKE, «FLUKE Keeping your world up and running,» [En línea]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html>. [Último acceso: 2017].

- [12] HEIDOLPH, «heidolph research made easy,» [En línea]. Available: <http://www.heidolph-instruments.com>.
- [13] Electronics, Optek / TT, «Mouser Electronics,» [En línea]. Available: <http://co.mouser.com/ProductDetail/TT-Electronics/OP913WSL/?qs=%2fha2pyFaduiPYb5TIW6EG5BvOccFdOf57vj28YJy2sQ%3d>. [Último acceso: 2017].
- [14] J. Graeme, PHOTODIODE AMPLIFIERS OP AMP SOLUTIONS, The McGraw-Hill, 1995.
- [15] M. A. Martínez, J. M. Andújar y J. M. Enrique, «A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range,» *Open Access*, p. 20, 2009.
- [16] Hukseflux, «Hukseflux Thermal Sensors,» [En línea]. Available: http://www.hukseflux.com/product/sr11-tr-pyranometer?referrer=/product_group/pyranometer. [Último acceso: 19 Enero 2017].
- [17] STMicroelectronics, «ST life.augmented,» [En línea]. Available: http://www.st.com/content/st_com/en.html. [Último acceso: 2017].
- [18] J. J. Chacón Avendaño y R. A. Ortiz Jurado, «Implementación de un prototipo para la caracterización de Paneles Fotovoltaicos,» Bucaramanga, 2016.
- [19] BEIJING HYXC TECHNOLOGY CO, LTDA, «<https://es.aliexpress.com/>,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/PT1000-temperature-sensor-two-wire-wire-length-2-meters>.
- [20] AOSONG, «Electrónica I+D (Didacticas Electronicas),» [En línea]. Available: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/temperatura/sensor-de-humedad-y-temperatura-am2305-detail>. [Último acceso: 2016].
- [21] E. Huerta, A. Mangiaterra y G. Noguera, GPS Posicionamiento Satelital, Rosario, Argentina: UNR, 2005.
- [22] N. y. C. p. S. Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento,

- «GPS.gov,» [En línea]. Available: <http://www.gps.gov/spanish.php>. [Último acceso: 2 Octubre 2016].
- [23] WAVESHARE share awesome hardware, «Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/gps/m%C3%B3dulo-uart-gps-neo-7m-c-b-ws-uart-gps-neo-7m-c-b-detail>.
- [24] «Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/wifi/m%C3%B3dulo-wifi-serial-esp-07-detail>.
- [25] PatagoniaTec, «PatagoniaTec Blog,» [En línea]. Available: <http://saber.patagoniatec.com/esp8266-modulo-wifi/>. [Último acceso: 2 Octubre 2016].
- [26] Arduino, «ARDUINO,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>.
- [27] LEM, «Voltage Transducer LV 25-P,» 2013. [En línea]. Available: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.27.19.000.0/.
- [28] LEM, «Current Transducer LA 25-NP,» 2011. [En línea]. Available: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.08.19.000.0/.
- [29] ITEAD, «Itead,» [En línea]. Available: <https://www.itead.cc/itdb02-5-0.html>.
- [30] ITEAD, «Itead,» [En línea]. Available: <https://www.itead.cc/itdb02-arduino-mega-shield.html>.
- [31] Trinasolar, «Datasheet,» [En línea]. Available: <http://www.trinasolarstore.com>.
- [32] Synthesis Power, «Datasheet,» [En línea]. Available: <http://www.synthesis-power.com>.
- [33] O. /. T. Electronics, «Mouser Electronics,» [En línea]. Available: <http://co.mouser.com/ProductDetail/TT->

Electronics/OP913WSL/?qs=%2fha2pyFaduiPYb5TIW6EG5BvOccFdOf57vj2
8YJy2sQ%3d.

BIBLIOGRAFIA

AGGARWAL, V. «energysage,» 8 Marzo 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.energysage.com/>.

AOSONG, «Electrónica I+D (Didacticas Electronicas),» [En línea]. Disponible en: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/temperatura/sensor-de-humedad-y-temperatura-am2305-detail>. [Último acceso: 2016].

ARDUINO, «ARDUINO,» [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>.

BEIJING HYXC TECHNOLOGY CO, LTDA, «<https://es.aliexpress.com/>,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/PT1000-temperature-sensor-two-wire-wire-length-2-meters>.

CHACÓN AVENDAÑO J. J Y ORTIZ JURADO, R. A. «Implementación de un prototipo para la caracterización de Paneles Fotovoltaicos,» Bucaramanga, 2016.

«Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/wifi/m%C3%B3dulo-wifi-serial-esp-07-detail>.

ELECTRONICS, OPTEK / TT, «Mouser Electronics,» [En línea]. Disponible: <http://co.mouser.com/ProductDetail/TT-Electronics/OP913WSL/?qs=%2fha2pyFaduiPYb5TIW6EG5BvOccFdOf57vj28YJy2sQ%3d>. [Último acceso: 2017].

FLUKE, «Fluke calibration,» [En línea]. Disponible en: <http://la.flukecal.com/>. [Último acceso: 2017].

FLUKE, «FLUKE Keeping your world up and running,» [En línea]. Disponible: <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html>. [Último acceso: 2017].

GRAEME, J. PHOTODIODE AMPLIFIERS OP AMP SOLUTIONS, The McGraw-Hill, 1995.

HEIDOLPH, «heidolph research made easy,» [En línea]. Disponible: <http://www.heidolph-instruments.com>.

HUERTA, E., MANGIATERRA A., y NOGUERA, G. GPS Posicionamiento Satelital, Rosario, Argentina: UNR, 2005.

HUKSEFLUX, «Hukseflux Thermal Sensors,» [En línea]. Disponible: http://www.hukseflux.com/product/sr11-tr-pyranometer?referrer=/product_group/pyranometer. [Último acceso: 19 Enero 2017].

ITEAD, «Itead,» [En línea]. Disponible en: <https://www.itead.cc/itdb02-5-0.html>.

ITEAD, «Itead,» [En línea]. Disponible en: <https://www.itead.cc/itdb02-arduino-mega-shield.html>.

LEM, «Current Transducer LA 25-NP,» 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.08.19.000.0/.

LEM, «Voltage Transducer LV 25-P,» 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,90.27.19.000.0/.

LINEAR, «LINEAR TECHNOLOGY,» Datasheet, [En línea]. Available: <http://www.linear.com/product/LTC1051>. [Último acceso: 2016].

MARTÍNEZ, M. A., ANDÚJAR, J.M. y ENRIQUE, J. M. «A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range,» *Open Access*, p. 20, 2009.

MORENO VELASCO, I «SENSORES RESISTIVOS,» de *Apuntes de Instrumentación Electrónica (ver. 5.5.)*, pp. 23-24.

N. y. C. p. S. Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, «GPS.gov,» [En línea]. Disponible en: <http://www.gps.gov/spanish.php>. [Último acceso: 2 Octubre 2016].

NASA y N. Hall, «National Aeronautics and Space Administration,» [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunwheat.html>. [Último acceso: 2016].

NATIONAL INSTRUMENTS, «National Instruments,» 5 Abril 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/tutorial/7115/es/>. [Último acceso: 2017].

O. /. T. Electronics, «Mouser Electronics,» [En línea]. Disponible en: <http://co.mouser.com/ProductDetail/TT-Electronics/OP913WSL/?qs=%2fha2pyFaduiPYb5TIW6EG5BvOccFdOf57vj28YJy2sQ%3d>.

PATAGONIATEC, «PatagoniaTec Blog,» [En línea]. Available: <http://saber.patagoniatec.com/esp8266-modulo-wifi/>. [Último acceso: 2 Octubre 2016].

PODE, R. y DIOUF, B. Solar Lighting (Green Energy and Technology), Seoul: Springer, 2011.

REN21, «RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT,» *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, pp. 28-42, 2016.

STMICROELECTRONICS, «ST life.augmented,» [En línea]. Disponible en: http://www.st.com/content/st_com/en.html. [Último acceso: 2017].

SYNTHESIS POWER, «Datasheet,» [En línea]. Disponible en: <http://www.synthesis-power.com>.

THE ECO EXPERTS, «The Eco Experts,» [En línea]. Disponible en: <http://www.theecoexperts.co.uk/which-solar-panels-are-most-efficient>. [Último acceso: 2017].

TRINASOLAR, «Datasheet,» [En línea]. Disponible en: <http://www.trinasolarstore.com>.

VERA, L.H., «Programa Computacional para Dimensionamiento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos,» Porto Alegre, 2004.

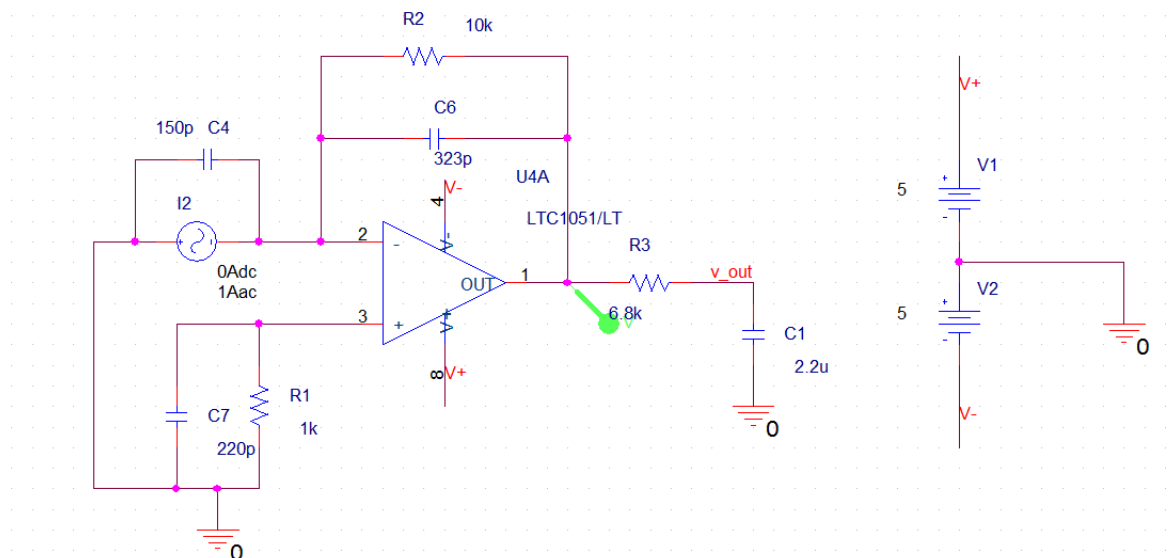
WAVESHARE share awesome hardware, «Electrónica I+D,» 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.didacticaselectronicas.com/index.php/comunicaciones/gps/m%C3%B3dulo-uart-gps-neo-7m-c-b-ws-uart-gps-neo-7m-c-b-detail>.

Anexo A. Sensor de Irradiancia (Piranómetro)

En este anexo se presentan las capturas del esquemático, la simulación y el circuito impreso para el sensor de irradiancia del prototipo.

Esquemático Circuito.

Imagen 47. Esquemático sensor de irradiancia



Simulación.

Imagen 48. Respuesta en frecuencia (Magnitud y Fase)

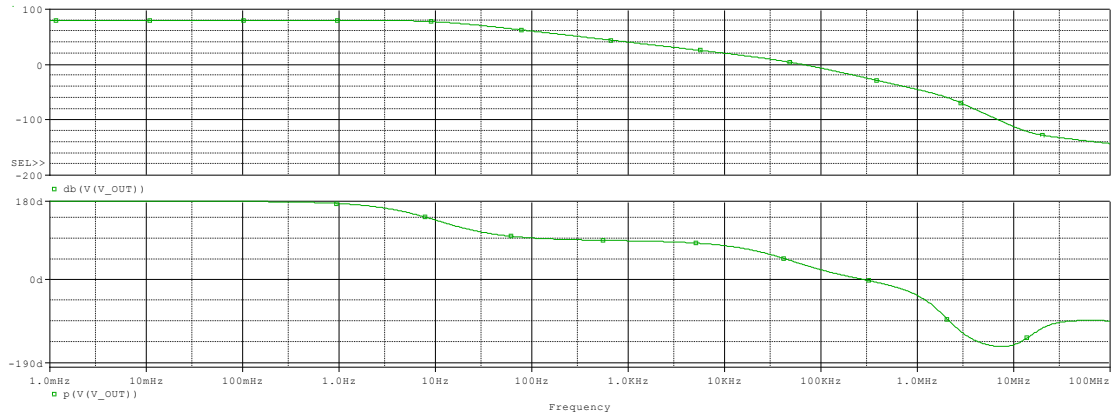
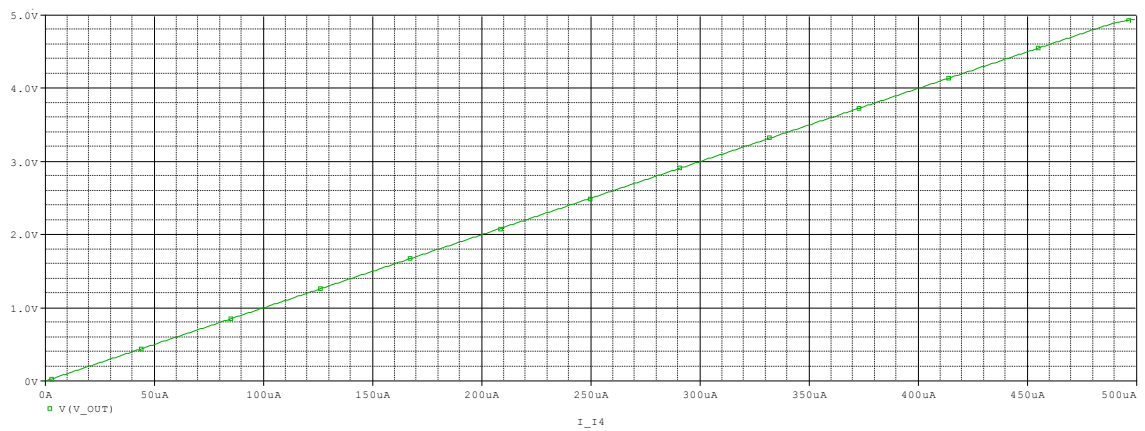
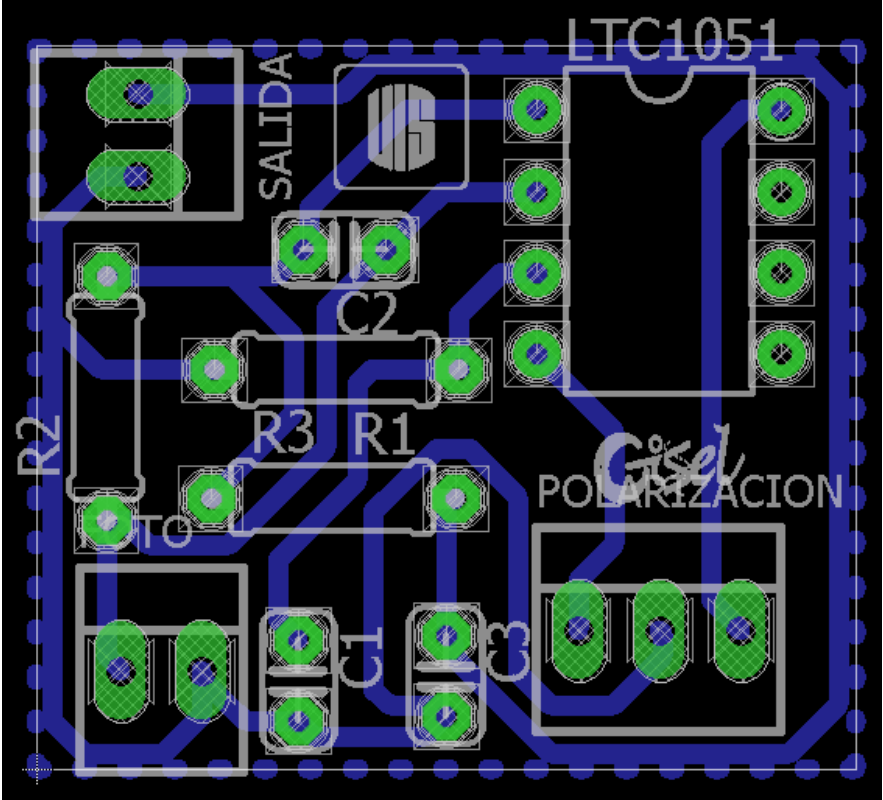


Imagen 49. Variación de la corriente en el fotodiodo, barrido en DC



Circuito Impreso.

Imagen 50. PCB sensor de irradiancia

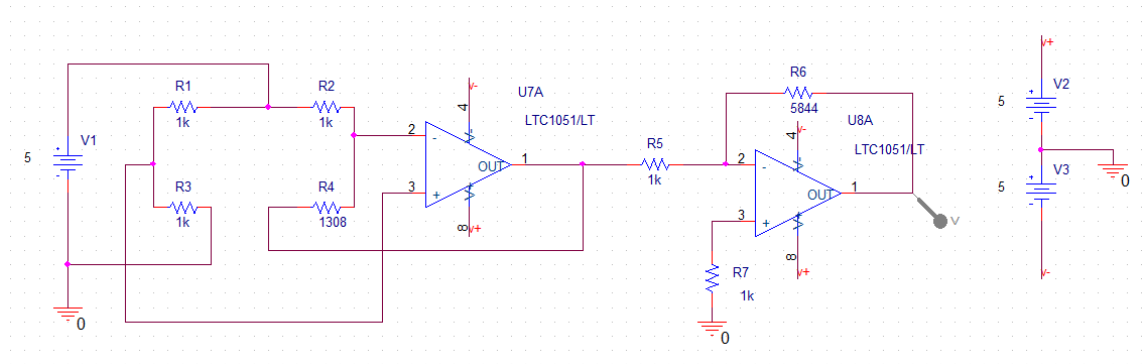


Anexo B. Sensor de Temperatura del Panel.

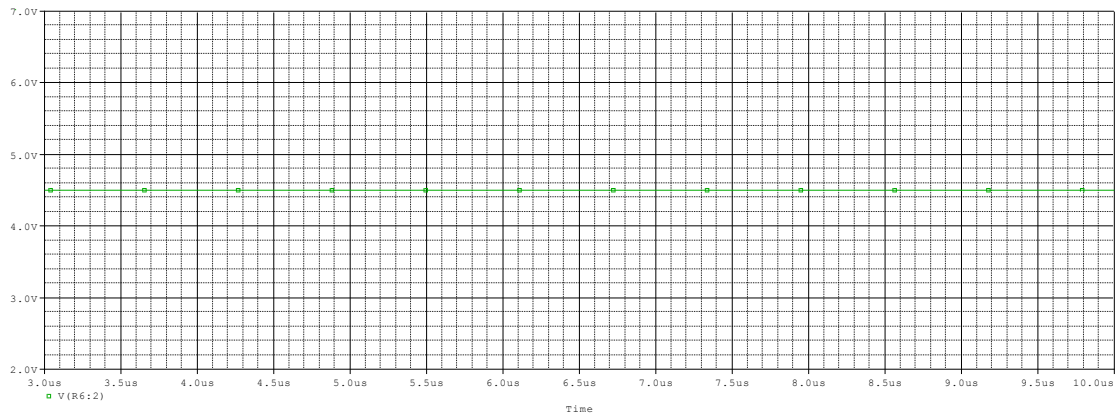
En este anexo se presentan las capturas del esquemático, la simulación y el circuito impreso del sensor de temperatura del panel del prototipo.

Esquemático Circuito.

Imagen 51. Esquemático del sensor de temperatura del panel

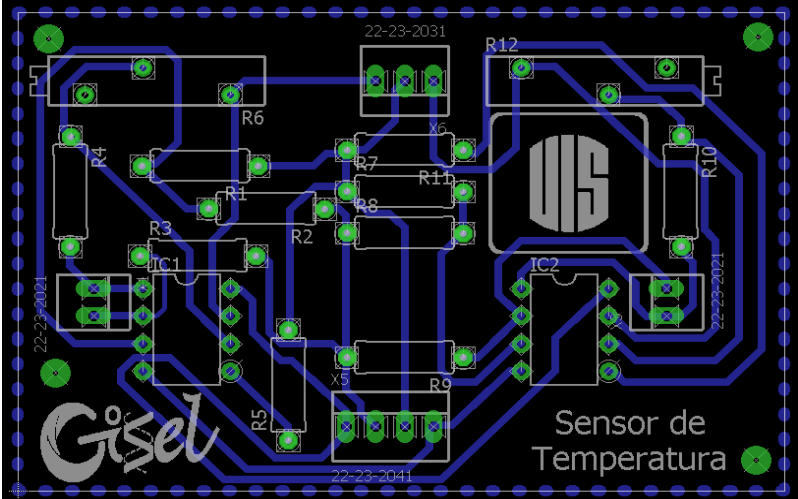


Simulación.



Circuito Impreso.

Imagen 52. PCB sensor de temperatura del panel

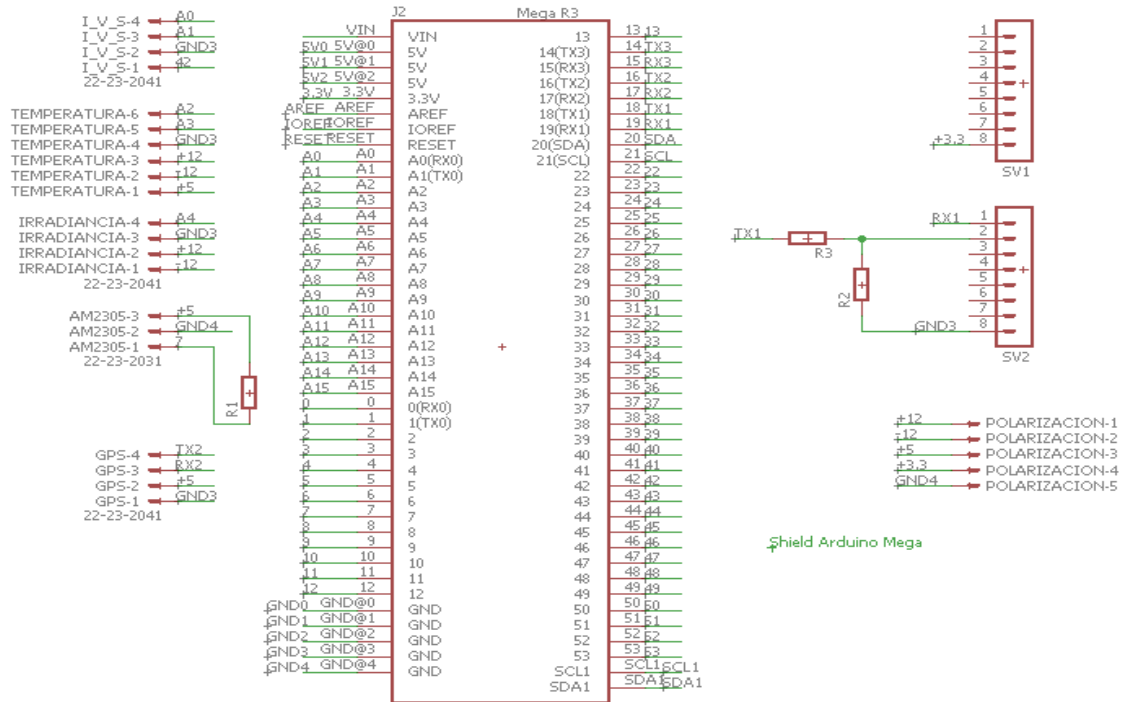


Anexo C. Shield para el Acople de los Circuitos de Sensado al Arduino.

Todos los sensores son acoplados al Arduino mediante esta Shield, para una fácil conexión.

Esquemático Circuito.

Imagen 53. Esquemático Shield de acople para los sensores a la tarjeta Arduino



Circuito impreso.

Imagen 54. PCB Shield de acople para los sensores a la tarjeta Arduino

