

Prototipo basado en transductor solar de bajo costo para el monitoreo de la irradiancia solar

Prototype based on a low-cost solar transducer for monitoring solar irradiance

César Ramos Ancajima¹, Cristhian Nicolas Aldana Yarleque¹, José Luis HuayanayVillar¹, Jorge Carlos Mogollón Rojas¹, Jorge Arnold Palacios García¹, Wilmer Moncada Sosa²

Instituto de Investigación en Economía y Eficiencia Productiva, Universidad Nacional de Frontera – UNF, Sullana, Piura, Perú

Laboratorio de Teledetección y Energías Renovables, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

RESUMEN

El principal objetivo de la investigación es el diseño, construcción y calibración de un prototipo de bajo costo, basado en un transductor solar; él cual permitió el monitoreo de la irradiación solar global en una determinada región geográfica de la ciudad de Sullana. El prototipo, utilizó dos etapas para realizar la toma de datos. 1) Etapa de detección, elemento primario de la medición, se utilizó una celda fotovoltaica policristalina cuadrada de 65mm; 2) Etapa es la conversión de la señal analógica a digital, se utilizó un convertidor (ADC). El control de la información se realiza por medio de un microcontrolador ATM328P; mientras que el control físico del dispositivo se realiza mediante botoneras. Los datos obtenidos se guardan automáticamente en la memoria interna del dispositivo y simultáneamente en una tarjeta extraíble microSD; visualizándose los datos en una pantalla OLED instalada para el monitoreo en tiempo real. Además, se le incorporo un módulo bluetooth para la transferencia de datos respectivos a una laptop, smartphone o PC.

Palabras clave: Irradiancia Solar; Celda Fotovoltaica; Pirómetro; Bluetooth; Microcontrolador.

ABSTRACT

The main objective of the research is the design, construction and calibration of a low-cost prototype, based on a solar transducer, which allowed the monitoring of global solar irradiance in a certain geographic region of the city of Sullana. The prototype used two stages to collect data. 1) Detection stage, primary element of the measurement, a 65mm square polycrystalline photovoltaic cell was used; 2) Stage is the conversion of the analog signal to digital, a converter (ADC) was used. Information control is carried out by means of an ATM328P microcontroller; while the physical control of the devise is carried out using keypas. The data obtained is automatically saved to the internal memory og the device is carried ount using keypads. The data obtained is automatically saved to the internal memory of the device and simultaneously to a removable microSD card; The data is displayed on an OLED screen installed ford real-time monitoring. In addition, a Bluetooth module was incorporated for the transfer of respective data to a notebook, smartphone or PC.

Keywords: Solar irradiance; Photovoltaic cell; Pyranometer; Bluetooth; Microcontroller.

¹ Instituto de Investigación en Economía y Eficiencia Productiva, Universidad Nacional de Frontera – UNF, Sullana, Piura, Perú. Email: ancajima.ramos@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la civilización ha ido en paralelo con la creciente demanda de energía, la que fue satisfecha en diferentes épocas con diferentes fuentes de energía. En los últimos dos siglos la principal fuente de energía es la proveniente de los hidrocarburos y sus derivados, hoy la producción de energía a nivel mundial es del 75% por combustibles fósiles, 12% por combustión de madera, 6% por energía hidráulica Camarena, (2018). Mientras que un 5% está constituido por energía nuclear, y solo un 2% por energía solar y otras formas de energía (Casal, 2018).

El aprovechamiento de las energías renovables, es un factor clave en el desarrollo de nuevos mecanismos que contribuyan a la sostenibilidad en la mitigación al cambio climático. El aumento del precio del petróleo, los problemas que ocasiona su derrame, la contaminación ambiental producto de la emanación de gases, el aumento de temperatura en el planeta, ruptura de la capa de ozono, entre otros, han incrementado el interés por el estudio y utilización de las fuentes de energías limpias y renovables, en particular de la energía solar (Duffiey, 2012). El Perú, posee un importante potencial de energético en comparación a otros países del mundo, debido a su cercanía a la línea ecuatorial, siendo la costa sur, en las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna (entre los 16° y 18° de latitud sur) las zonas con mayor potencial, con un promedio anual de energía solar incidente diaria de 5,5 a 6,5 kWh/m². Otras zonas en las que se registra alta disponibilidad de energía solar diaria, entre 5,0 a 6,0 kWh/m² son la costa norte, en las regiones de Piura y Tumbes (3° a 8° de latitud sur) (SENAMHI, 2003).

En nuestro litoral el monitoreo de los parámetros atmosféricos y en especial de la radiación solar, se realizan con equipos y/o estaciones meteorológicas de alta gama, instaladas por SENAMHI, que muchas veces la información que proporcionan es limitada, ello debido a que no se actualizan en tiempo real y no están al alcance de los diferentes grupos de interés involucrados en la línea temática de la presente investigación. El departamento de Piura pertenece a la región norte del Perú; se encuentra ubicado a 5.10° latitud sur, tiene en promedio de 8 a 10 horas de sol diarias, las cuales proporcionan un elevado potencial energético.

Esta energía disponible debe ser aprovechada para solucionar el problema de aquellos lugares que no tienen conexión a red eléctrica, limitándoles a una atención médica de calidad, mejores oportunidades educativas (PNER, 2024). Sin embargo, la cuantificación de este recurso energético e identificación de puntos óptimos en áreas geográficas estratégicas es imprescindible para impulsar el uso masivo de esta energía alternativa. Tal es así que, existe la necesidad de contar con un dispositivo que permita medir la radiación solar global, de manera digital, que sea portátil, de bajo costo y proporcione datos confiables. Y además nos permita realizar evaluación de secadores solares, colectores solares, cocinas solares, instalaciones fotovoltaicas y todos aquellos dispositivos que convierten energía radiante en calor de baja temperatura ($T < 100$ °C).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección de la investigación, se detalla las diferentes etapas empleadas para el diseño y la implementación del prototipo. Inicialmente se elaboró un esbozo en papel del circuito eléctrico a manera de borrador, en cual permitió elegir componentes claves para el prototipo, los cuales fueron integrados en el software de simulación PROTEUS 8.7 Sp2 para facilitar la selección de los materiales finales, detallados en la tabla 1.

Tabla 1.

Materiales para la implementación del circuito del prototipo de piranómetro.

Cantidad	Materiales	Descripción
01	Arduino Nano	V3.0
01	Celda Solar Policristalina	silicio 0.6W
01	Regulador de Carga	LTC4056
01	LCD OLED	128x32 I2C
01	Memoria Msd	1GB
01	Born mSD	
01	Bluetooth	HC05
01	Batería de Litio	5V (2500mAH)
01	Fibra de vidrio	10x10 Doble
01	Estaño	5 m
01	Ácido férrico	

Además, usando la opción visualización en 3D del software permitió distribuir cada uno de los módulos que constituyen el circuito eléctrico, para reducir y simplificar espacios al momento de acoplarlos en la tarjeta electrónica.

Figura 1.

Circuito eléctrico y tarjeta electrónica del prototipo de piranómetro.

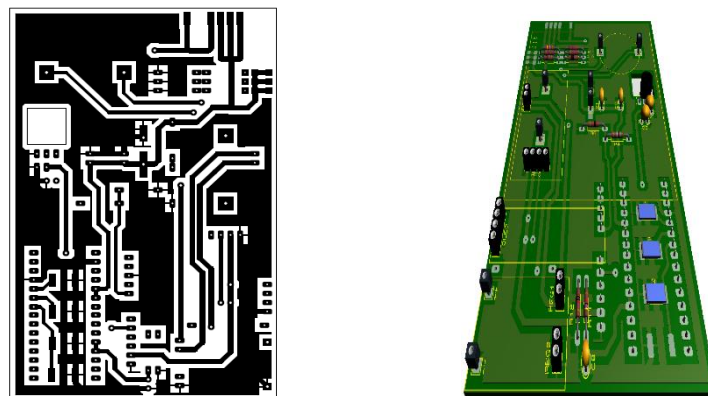
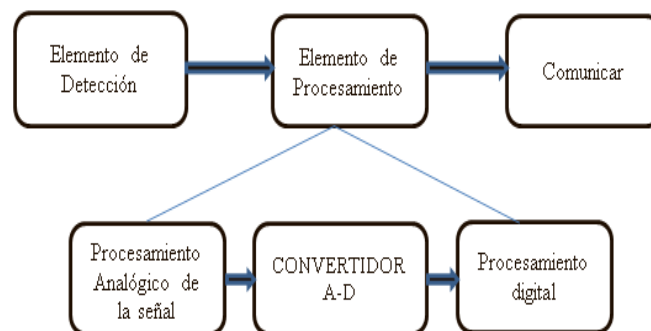


Figura 2.

Diagrama de las funciones del sistema electrónico de medida.



En el funcionamiento del prototipo se evidencian dos etapas bien marcadas en el diagrama de bloques de la figura 2: procesamiento analógico de la señal, conversión analógica a

digital a través del ADC y una última no menos importante es la de comunicar, donde podemos visualizar la data obtenida, por medio de un display.

2.1. Montaje experimental.

La celda solar fotovoltaica es el componente central del circuito analógico en el montaje experimental; es el dispositivo electrónico de bajo costo usado como traductor que convierte la luz solar en corriente eléctrica gracias a las propiedades de material semiconductor, esto se logra mediante el efecto fotovoltaico (González, 2009). En el presente proyecto se utilizó una celda solar de silicio policristalino con un 98% de pureza, como se aprecia en la figura 3.

Figura 3.

Celda fotovoltaica (grafico izquierdo) y circuito del ADC (grafico derecho).

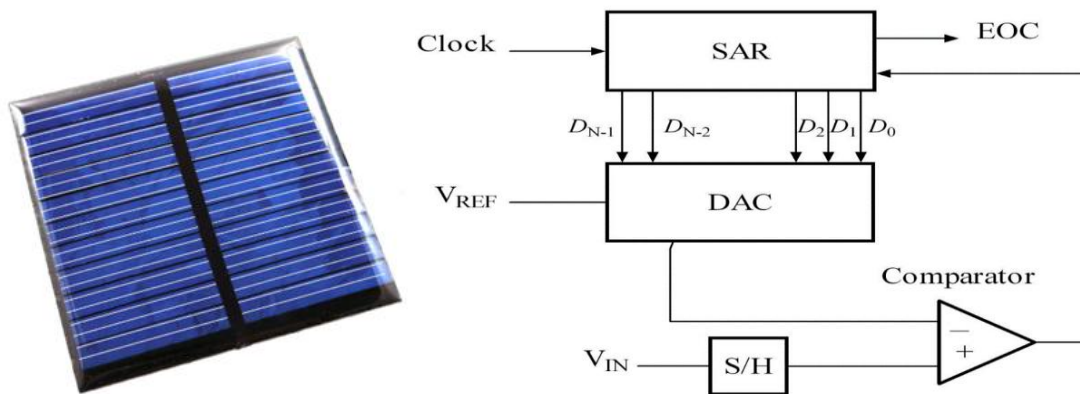
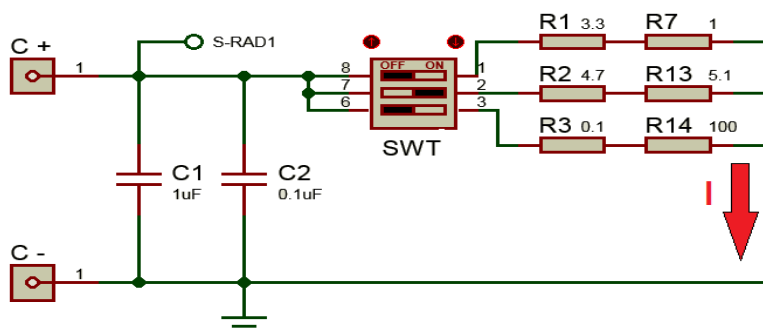


Figura 4.

Circuito de filtrado y selector de carga.



Para medir la irradiancia solar, se utiliza la corriente de cortocircuito de la celda, que es proporcional a esta. Por lo tanto, se conecta un circuito de filtrado selector de carga a los terminales de la celda como se aprecia en la figura 4, para poder realizar una medición de manera precisa y controlada.

2.2. Circuito de filtrado selector de carga

Circuito eléctrico, visualizado en la figura 4 consta de tres configuraciones de resistencias en serie, usadas como cargas a las que se les denominaron canales, C₁, C₂, C₃. Estos canales

se usan para medir distintos niveles de exposición de radiación (interiores de viviendas, solar y alta). Dependiendo del tipo de radiación que se desea medir, se seleccionara la carga correspondiente, mediante un interruptor (SWT), el voltaje medido (pin S.RAD1) no debe exceder los 1.1 voltios (voltaje de referencia del ADC). para la calibración y toma de datos del proyecto se usó el canal dos (C2), los otros canales serán motivo de calibración y toma de datos en futuras investigaciones.

CANAL 2. Este canal posee una resistencia equivalente de 9.8Ω ($4.7 \Omega + 5.1 \Omega$) permitiendo registrar corrientes de la celda menores a 112mA como se aprecia en la ecuación (1) y ecuación (2).

$$I_{m\acute{a}x} \leq \frac{1100 \text{mV}}{9.8 \Omega} \quad (1)$$

$$I_{m\acute{a}x} \leq 112.245 \text{ mA} \quad (2)$$

permitirá exponer el piranómetro a irradiancias comprendidas entre 0 W/m^2 1100 W/m^2 en un tiempo de exposición a la radiación solar de manera prolongada. La figura 4 muestra el circuito de filtrado donde los bornes (C+, C-) se conectan a la celda solar respetando la polaridad. En paralelo, se colocan dos capacitores cerámicos $1\mu\text{F}$ y $0.1\mu\text{F}$ para filtrar el ruido eléctrico que puede interferir con la lectura del voltaje por el ADC en la etapa digital del circuito.

En este diseño de circuito, no necesita amplificar la señal de voltaje de la celda solar, ya que el Arduino tiene incorporado un microcontrolador ATMEGA328P tiene un voltaje de referencia seleccionable de 1.1V en sus conversores ADC. Cabe mencionar que el ADC de la figura 5 es de 10 bits, y nos proporciona 2^{10} valores posibles, entonces, tenemos como nivel de cuantificación Q o bit menos significativo (LSB) (Ogata, 1996), con una resolución de:

$$Q = \frac{1.1 \text{ V}}{2^{10} - 1} = 1.075 \text{ mV} \quad (3)$$

En este diseño, no se incluye un circuito acoplador de impedancias debido a que el puerto del microcontrolador conectado al ADC tiene una alta impedancia muy alta ($10 \text{M}\Omega$), lo que hace que la impedancia del ADC sea insignificante para la carga de la celda solar. Para el monitoreo de la temperatura de la celda, se incorporó un sensor de temperatura.

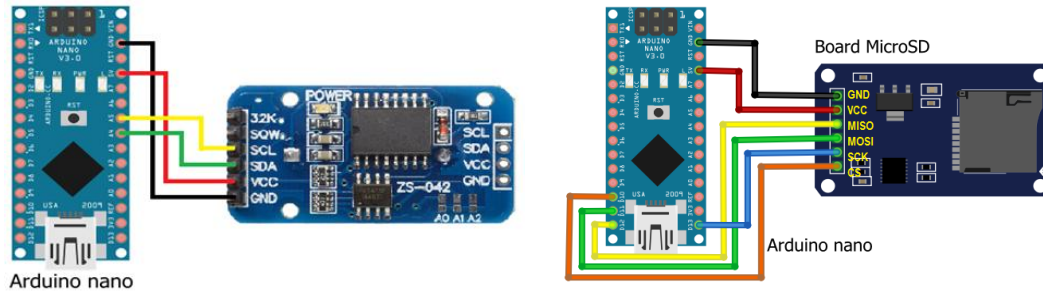
2.3. Sensor de temperatura LM35

El sensor este acoplado a la tarjeta electrónica del prototipo por medio de un circuito como se aprecia en figura 6, tiene una salida analógica lineal, trabaja -55°C hasta 150°C . Está recalibrado en fábrica para una precisión específica 0.5°C , se alimenta con un voltaje determinado 5V y su salida varía entre 0V y 1.5V el cual es leído por el ADC Figura 5. El pin V_{CC1} recibe 3.3V en relación a GND y el pin S-TEMP es la salida del sensor temperatura y se conecta al ADC. Se añaden capacitores cerámicos 1nF para filtrar ruidos en la alimentación y la señal.

otros dispositivos, y permite llevar un orden de la información registrada, de irradiancia solar, temperatura de la celda y el nivel de la batería.

Figura 7.

Diagrama de conexiones RTC DS3231/Arduino nano y Circuito de conexión RTC DS3231/Arduino.



2.7. Módulo Board MicroSD y MicroSDHC

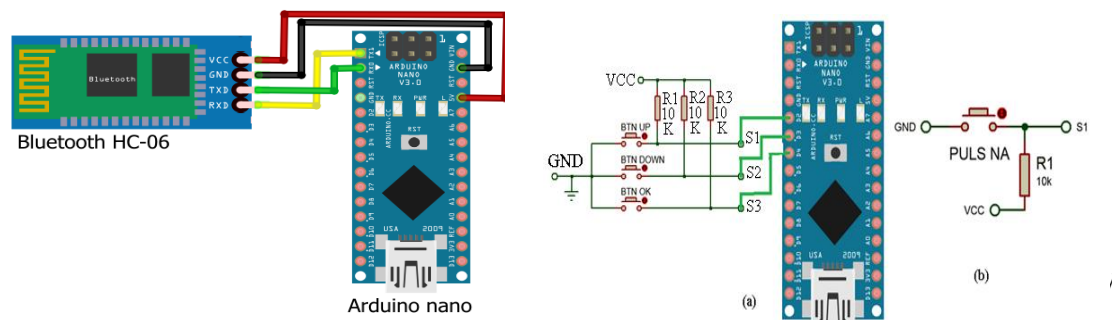
Este módulo permite insertar memorias MicroSD (hasta 2GB) y MicroSDHC (hasta 32GB), posee una comunicación SPI y voltaje de 3.3V. Es importante ya que permite proporcionar alta capacidad de almacenamiento para datos de temperatura, irradiancia, nivel de batería, fecha y hora, facilitando el acceso ordenado a esta información en el tiempo. Se realizaron modificaciones en los pines para integrarlo en la tarjeta, y al arduino, como se muestra en la Figura 7.

2.8. Módulo Bluetooth hc-06

transmite datos en tiempo real a dispositivos como smartphones o PC. Se habilita en la configuración del piranómetro y requiere un pin de sincronización. Los datos incluyen irradiancia, temperatura, tiempo de muestreo y nivel de batería, y se visualizan mediante un programa de "Monitor Serial" y están conectados al Arduino como se muestra en la figura 8.

Figura 8.

Diagrama de conexiones bluetooth HC-06/Arduino nano y Conexiones pulsadores.



como se muestra la figura 9, mientras que el tercero es una entrada digital. Cada uno tiene una resistencia de 10kΩ.

2.10. Sistema de carga y alimentación.

Incluye el **módulo carga LTC4056**, que fija el nivel máximo de carga y desconecta la carga si el voltaje es bajo para proteger la batería, el cual se visualiza en Figura 9. También protege contra sobretensión y polaridad inversa, con una corriente máxima de carga de 1A para la batería de ion-litio de una sola celda. También engloba un pequeño circuito

divisor de voltaje y filtros de señal para la lectura del voltaje de la batería, como se aprecia en la En la Figura 10.

Figura 9

Conexiones de todo el circuito de carga hacia el Arduino Nano.

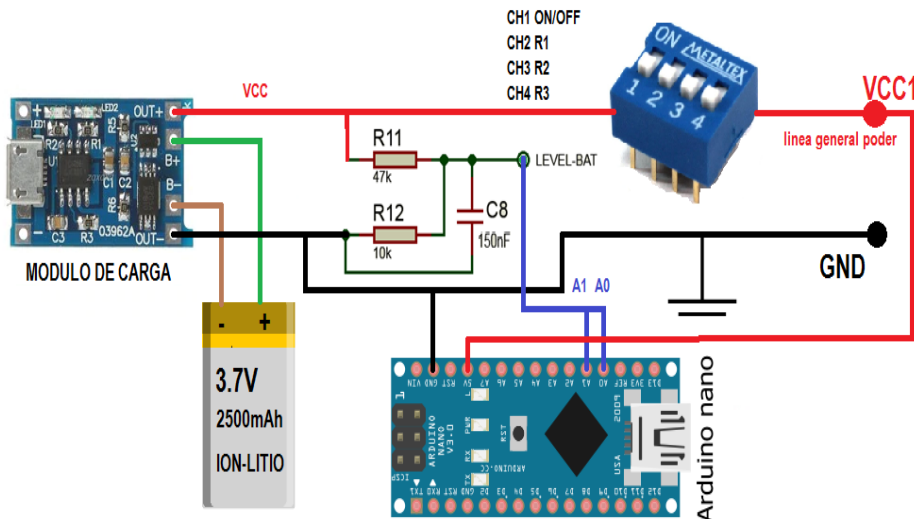
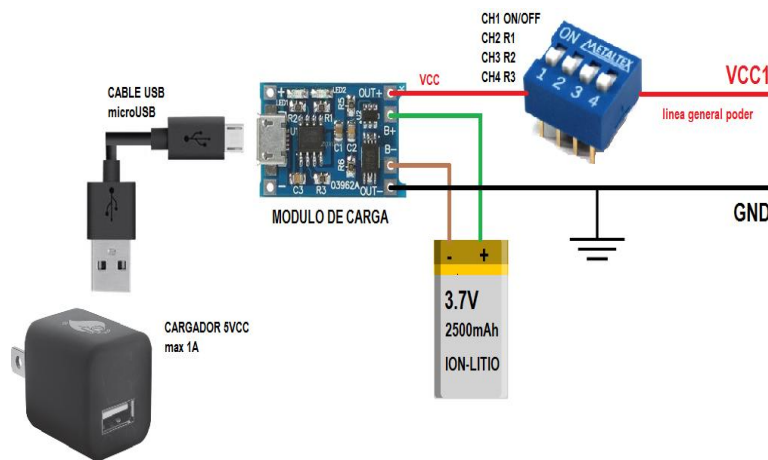


Figura 10

Circuito de conexión del módulo de carga de la batería.



El estudio presenta un enfoque cuantitativo, experimental de tipo básico aplicado. La hipótesis general planteada fue que existe la posibilidad de diseñar, construir y calibrar un prototipo basado en transductor solar de bajo costo para el monitoreo de la irradiancia solar. Las variables de estudio incluyeron el prototipo de piranómetro utilizando un transductor de bajo costo y el monitoreo de la irradiancia solar, considerando su precisión, sensibilidad, estabilidad y respuesta en tiempo real.

Una vez construido el piranómetro según las especificaciones descritas en el ítem anterior, el siguiente paso fue su calibración, la cual se realizó en las instalaciones de la estación meteorológica de la Universidad de Piura, ubicada en 5.1° de latitud sur y de 80.6° longitud oeste, desarrollándose en dos partes. En primera instancia se configuro el software ingresando a “Config”, figura 11, seleccionamos el menú “Escala”,

visualizándose luego la figura 12; donde se selecciona la escala 2 que corresponde a la irradiancia solar que se desea medir.

Figura 11.

Screen 1.2.3 el cual permite seleccionar el escalador para la calibración.



Figura 12.

(a) y (b) Muestra el screen del factor de calibración.



El segundo paso es el proceso de calibración del prototipo de piranómetro construido. Este proceso implica ajustar el factor de calibración como se evidencia en la figura 12(b) esto de manera manual hasta que las lecturas de irradiancia coincidan entre el piranómetro de referencia y el piranómetro que esto se realizó unos días antes de empezar con la calibración final, de preferencia al medio día.

3. RESULTADOS

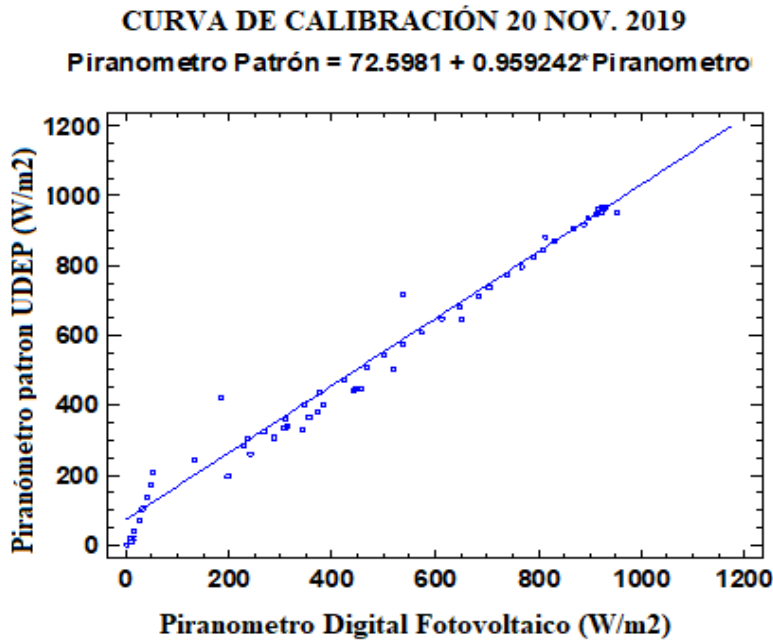
La calibración del prototipo se realizó siguiendo la norma ISO 9847 por comparación con un piranómetro patrón. Los valores registrados de irradiancia solar global del prototipo, se compararon con los datos obtenidos en la estación meteorológica UDEP la cual contaba con un piranómetro clase CM21 de la marca Kipp & Zonen – ISO 9060 – sensibilidad 0.1%. El análisis de los datos permitió obtener la curva de calibración como se evidencia en la gráfica 1.

Durante una semana, se registraron evaluaciones de irradiancia solar utilizando el prototipo de piranómetro y el piranómetro patrón. El objetivo fue identificar un día específico en el cual se obtenga la curva de calibración más óptima. Se ajustaron los

valores registrados del prototipo de piranómetro cada diez minutos para que coincidieran con los del piranómetro patrón.

Figura 13.

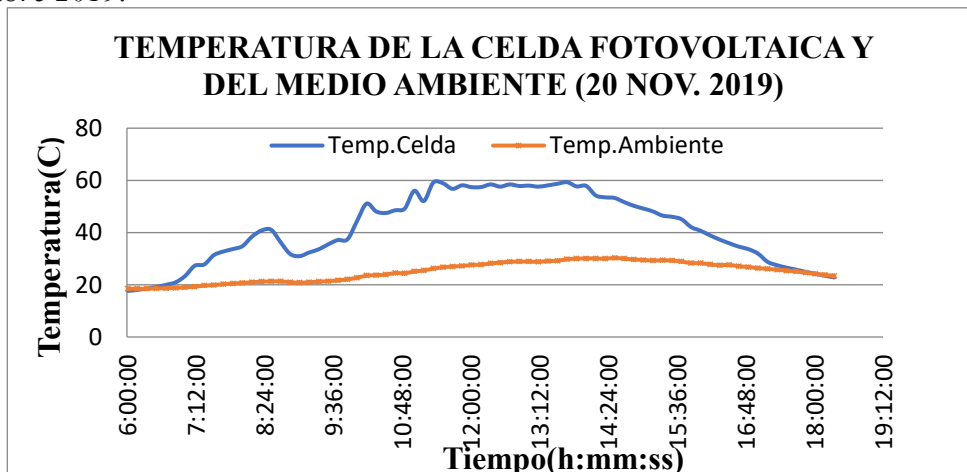
Curva de calibración entre Piranómetro Patrón Udep y Prototipo de Piranómetro el día 20 de noviembre 2019.



La gráfica nos muestra la curva de calibración entre las mediciones de irradiancia solar obtenidas por el piranómetro patrón y el prototipo de piranómetro, demostrando la existencia de una fuerte correlación. Esta relación permite generar una ecuación (modelo) para predecir los valores de uno en función del otro, lo que asegura una alta confiabilidad, respaldada por un coeficiente de correlación de Pearson cercano al 97%. El módulo del vector de Poynting promedio en Piura el 20 de noviembre de 2019 fue de $(496.96 \pm 0.86) \text{ W/m}^2$.

Figura 14.

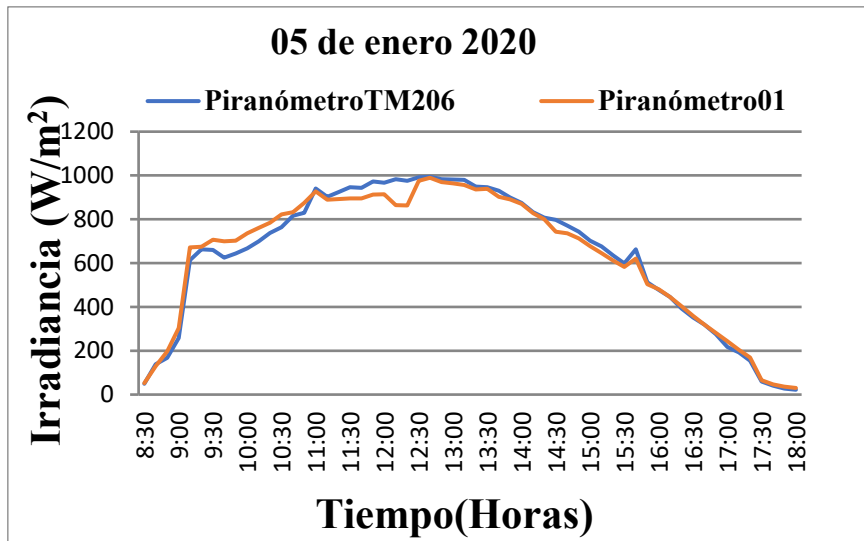
Temperatura de la celda fotovoltaica y la temperatura ambiente para el día 20 de noviembre 2019.



El prototipo de pirómetro de bajo costo en estudio fue comparado con un piranómetro comercial tipo TM206. Se analizaron datos de irradiación solar para el 05 de enero de 2020 y se representaron los resultados en una gráfica 3 para evaluar la precisión y fiabilidad del prototipo de piranómetro en comparación con el comercial.

Gráfica 15.

Irradiación solar registrada entre el piranometro TM206 y Prototipo de Piranómetro el día 05 de enero 2020.



Gráfica 16.

Curva de calibración obtenida, después de las pruebas de experimentación y validación.

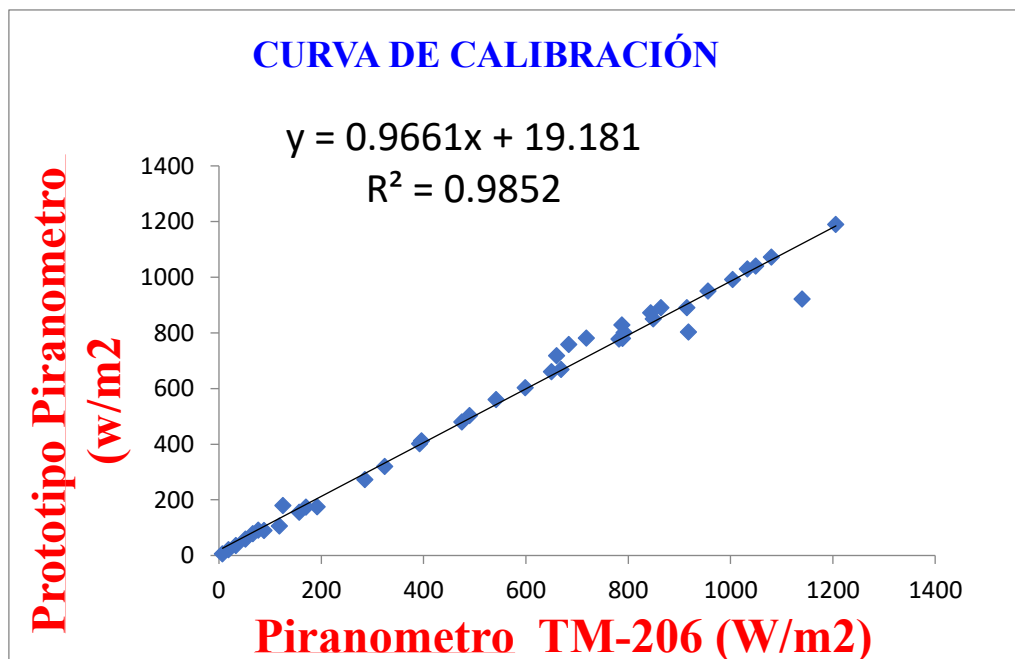
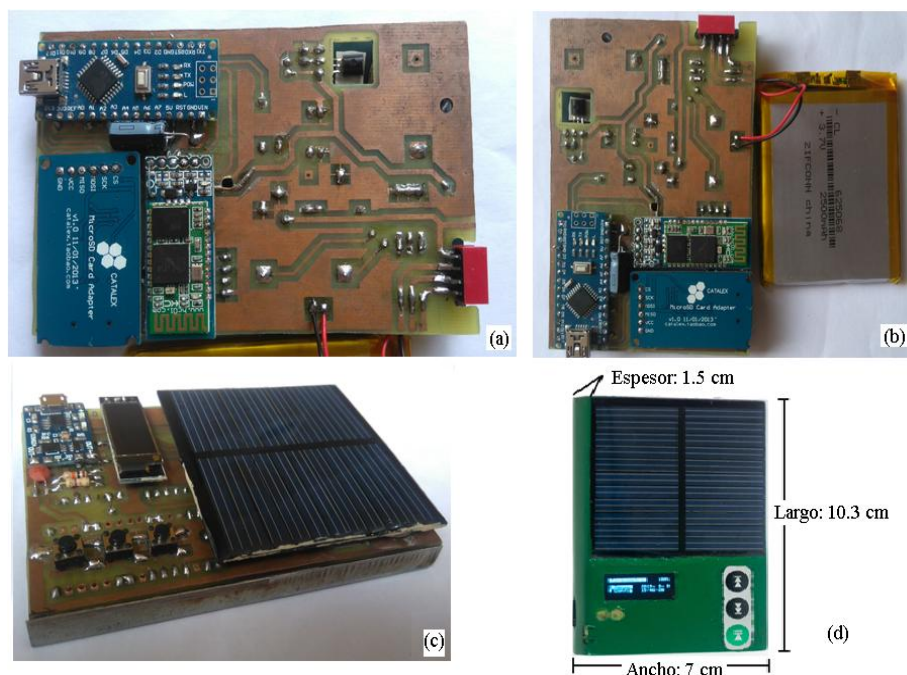


Figura 17.

(a) Vista posterior de la tarjeta del piranómetro. (b) Acoplamiento de la batería de litio a la tarjeta. (c) Vista frontal de la tarjeta conteniendo la celda fotovoltaica y el display. (d) Piranómetro digital



En la Figura 17, se muestra una ilustración del prototipo, que permitiera para futuros trabajos de investigación y mejora continua.

5. CONCLUSION

El presente proyecto se observó una dispersión inicial de los datos registrados, lo cual es contante con los patrones observados, en otros días durante la evaluación del equipo a calibrar. Como re-sultado, se llegó a la concluir de que está dispersión inicial se debe a la inercia del equipo al comenzar a registrar los datos.

El efecto de la temperatura en la celda se debe afecta notablemente su rendimiento; se estima que por cada grado centígrado de incremento de temperatura en las celdas se pierde 0.5% de po-tencia máxima. Para condiciones de radiación solar altas, la temperatura de las celdas llega con fa-cilidad a 55 - 65 °C, esto significa casi un 20% de pérdidas por efecto del calentamiento.

Se logró diseñar, construir y calibrar un Prototipo basado en transductor solar de bajo costo para el monitoreo de la irradiancia solar; el cual, mide la radiación solar global (W/m²) en el rango aproximado de 400 nm a 700 nm de longitud de onda, correspondiente al rango del espectro visible.

La visualización de la toma de los datos puede obtenerse mediante lectura directa en la pantalla del prototipo o ser trasladada mediante un cable de datos a otros equipos (laptop, celular, etc.) y de manera inalámbrica mediante bluetooth.

El prototipo de piranómetro fotovoltaico construido, presenta un error del 1% para temperaturas del ambiente menores e iguales a 40°C. Si se incrementa la temperatura, entre 55°C o 65°C el error, aumenta de alrededor del 7%. Esto se debe, a que existe mayor

generación de electrones en la fotocélula, siendo más caótico su desplazamiento en la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Camarena, M. (2018) Determinación del ángulo de inclinación óptimo de un panel fotovoltaico en el vallo del mataro. (Tesis de Licenciatura) . Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú.

Casal, C (2018). Caracterización de la radiación ultravioleta en la provincia de Huelva e incidencia en la productividad y el valor biotecnológico cultivos de interés comercial. (tesis doctoral). Universidad de Huelva., Huelva, España.

DuffieyBeckman. (2012). Solar Engineering of Termal Processes. (Cuarta Edición. ed.). USA: Edit. J.Wiley & Sons Inc.

González, J. (2009). Energías Renovable. Barcelona, España:Reverté, S.A.

Horn, M. (2011). Fundamentos de la Energía Solar. CER- UNI. Lima, Perú:UNI

K.Ogata. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto. México: Lynda Griffiths/TKM Productions.

Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER 2024-2033)

Recuperado de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5644885/5003343-plan-nacional-de-electrificacion-rural-pner-2024-2033.pdf?v=1704726119>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2003). Atlas de Energia solar del Perú. Recuperado de: dger.minem.gob.pe/atlassolar/