

# INSTRUMENTO AUTÓNOMO PARA LA MEDICIÓN, VISUALIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE VARIABLES CLIMÁTICAS

---

L. Vera<sup>1</sup>, C Cuestas<sup>2</sup>, A. Firman<sup>1</sup>, M Cáceres<sup>1</sup>, A Busso<sup>1</sup>

## RESUMEN:

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y calibración de un medidor portátil de irradiancia, PAR, temperatura y humedad, así como de todos los componentes que forman parte del sistema. El instrumento ha sido desarrollado en el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Universidad Nacional del Nordeste. El mismo contiene sensores digitales que le permiten medir la temperatura ambiente, humedad relativa y sensores analógicos para determinar el valor de la irradiancia y PAR. Es portable, posee una autonomía de 5 (cinco) días, una pantalla para mostrar las variables medidas y es capaz de registrar datos en una tarjeta SD cumpliendo con la función de *datalogger*. Conjuntamente se ha desarrollado un software para la lectura y representación en un display de las magnitudes medidas en función del tiempo. En esta etapa de la investigación se cuenta con un prototipo funcional calibrado en etapa de pruebas experimentales finales.

Palabras clave: instrumentación, radiación solar, adquisición de datos.

## INTRODUCCION

La creciente necesidad de utilizar fuentes renovables, reducir la demanda de energía y crear, o modificar, infraestructuras de carácter sustentable está creando un nuevo mercado asociado a estas demandas. Actualmente existen programas y planificación estratégica que se llevan a cabo para satisfacer la producción de energía a partir aprovechamiento del Sol, ya sea mediante su conversión fotovoltaicas, térmica, o su regulación con fines de evitar cargas térmicas con el fin de minimizar la energía de refrigeración. Es decir, el aprovechamiento, o bloqueo, de la energía solar posee vertientes según el tipo de aplicaciones específica con la que se trabaja.

Para cualquiera de los casos antes mencionados una medida adecuada de la radiación solar y algunas variables climáticas es esen-

---

GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE. Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.  
Tel./Fax: (0379) 4473931 int 116, e-mail: luis.horacio.vera@comunidad.unne.edu.ar

<sup>1</sup> Investigador Grupo en Energías Renovables – UNNE.

<sup>2</sup> Becario Grupo en Energías Renovables – UNNE.

cial para la adecuada elección, orientación y evaluación de capacidades energéticas.

De esta manera, la realización de un conjunto de mediciones específicas para cada lugar y tipo de aprovechamiento pueden garantizar los resultados correctos y por lo tanto la eficacia de la inversión realizada. Algunas aplicaciones en las cuales la medida de la radiación solar tiene importancia son: generación de energía eléctrica y térmica, en el estudio y modelación del crecimiento de los cultivos (Radiación fotosintéticamente activa, sus siglas en inglés PAR), estudios de aprovechamiento del recurso solar en viviendas y edificios, estudios de su influencia en la salud humana, entre otras muchas.

Para proporcionar una precisa evaluación del recurso solar, es necesario contar mayor cantidad de puntos de medición en el territorio nacional. Esta afirmación llevó a plantear la necesidad de incrementar el número de estaciones de medición de radiación directa, difusa y global (Righini, R y Aristegui, R. 2013). Sin embargo, el elevado costo de los instrumentos de medición, cuyo elemento sensor es una termopila, los tiempos políticos/académicos y una serie de proyectos sin continuidad no han permitido contar con una red solarimétrica apropiada considerando la extensión del territorio argentino. Existen pocas entidades, principalmente del ámbito académico o de investigación aplicada, que han desarrollado medidores nacionales con el fin de generalizar la mediciones del recurso solar (Bolzi, 2000, Vera *et al*, 2005), pero estas iniciativas no han tenido una conveniente proyección.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, el elevado costo de los instrumentos de medición, y que en general este tipo de equipos se manufacturan en el extranjero (lo que

representan un importante obstáculo para evaluar los recursos naturales) se planteó el desarrollo de un instrumento portátil y autónomo que mida la radiación solar global, PAR, temperatura y humedad relativa realizado con insumos del mercado nacional con las prestaciones de almacenar y visualizar las variables medidas. De esta manera, proporcionar una evaluación rápida y precisa del recurso solar y otras variables climáticas de interés energético a través de un equipo confiable y de bajo costo.

## DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para desarrollar el sistema de medición se evaluaron los sistemas existentes en el mercado, y se analizaron las mejoras necesarias para llegar a un equipo que responda de forma adecuada a los requerimientos de un usuario considerando la evolución del recurso o la verificación de sensores fijos instalados. Por lo expuesto, se planteó el desarrollo de un medidor portátil de radiación solar, PAR, temperatura y humedad.

### *Medición de irradiancia*

En general, para determinar el recurso solar disponible se utilizan sensores del tipo termopila (Piranómetros térmicos) o sensores que funcionan a través del efecto fotovoltaico (celdas FV o fotodiodos).

Los piranómetros térmicos (o de termopilas) son los instrumentos por excelencia utilizados para cuantificar la radiación solar. Los piranómetros están diseñados para tener una respuesta plana para todas las longitudes de onda hasta 2500 nm y proporcionar una salida estable independientemente de las condiciones de nubosidad y cambios de las condiciones ambientales. Los pira-

nómetros térmicos primarios y secundarios son instrumentos muy estables cuyos precios son más altos que los medidores que utilizan dispositivos FV (fotodiodo o celda).

Los piranómetros FV se basan en el efecto fotovoltaico. La radiación incide sobre un fotodiodo sensible a un intervalo del espectro solar y, de ese modo, la incidencia de radiación solar genera una corriente de corto circuito proporcional al valor de irradiancia (Luque y Hegedus, 2011). La corriente de la celda se obtiene mediante la medición de la caída de tensión a través una resistencia de pequeño valor y alta estabilidad térmica (*shunt*), la cual se conecta sobre los terminales positivo y negativo de la celda FV (Vera et al, 2005).

Para reproducir el comportamiento de un dispositivo térmico y disminuir el efecto coseno se agrega un elemento difusor antes de que la irradiancia incida sobre el fotodiodo.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se implementó el fotodiodo BPW34 que fue montado en una base de aluminio; como elemento protector para el sensor, y a su vez como difusor de luz, se utilizó una cubierta plana de teflón. Esta cobertura permite independizar parcialmente el valor de la radiación solar del ángulo de incidencia (Zanenco, 1991).

#### *Medición de la Radiación fotosintéticamente activa (PAR)*

La radiación solar está íntimamente vinculada con el crecimiento y la productividad de las plantas, especialmente en la fracción del espectro comprendida entre 400 y 720 nm, definida como radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Para la medición directa del PAR se utilizan fotodiodos de silicio a los cuales se modifica su respuesta a través de un filtro para proporcionar una respuesta “cuántica” en el rango de longitudes de onda que van de 400 a 720 nm (Righini y Grossi Gallegos, 2005).

El sensor utilizado en la medición de radiación fotosintéticamente activa es similar que al fotodiodo utilizado para medir la radiación solar global (BPW21), con la diferencia que este lleva un filtro, dejando pasar el espectro visible (400 a 720nm). Dicho sensor es conectado a una resistencia shunt, ubicado en un soporte de aluminio y con una cobertura difusora.

#### *Medición de la temperatura y humedad relativa*

Para la medición de temperatura y humedad relativa se implementó el sensor DHT22, este módulo combina un condensador de polímero para la medición de humedad relativa AM 2302 y un DS18B20 para la medición de temperatura (Sensirion, 2011). Fue seleccionado debido a su bajo costo, bajo consumo de energía encontrarse en el mercado nacional y ser digitales, de esta manera se logra inmunidad frente a problemas de ruidos y se evitan etapas de amplificación, condiciones que se verifican en los sensores analógicos.

El sensor de humedad relativa implementado usa tecnología de medición capacitivo. El dieléctrico es un polímero que absorbe agua proporcional a la humedad relativa del medio ambiente, y por lo tanto cambia la capacitancia del condensador.

El sensor DHT 22 está ubicado en el extremo de un vástago circular de plástico que propicia de elemento de soporte y manejo del sensor.

## IMPLEMENTACION DEL *HARDWARE*

Una vez seleccionados, o desarrollados, los sensores de radiación solar, PAR, temperatura y humedad se procedió a realizar el hardware que responda a las prestaciones de leer, almacenar y visualizar las variables medidas; con su correspondiente fecha y hora. Además, para que responda a la autonomía deseada, se seleccionó una batería y diseñó una fuente de alimentación cuya función es entregar un valor de tensión constante.

La fecha y hora se mantienen actualizadas a través de un reloj de tiempo real (RTC) modelo Pcf8563, se comunica mediante el uso del protocolo I<sup>2</sup>C.

En función de la demanda de los sensores y el display se seleccionó una batería de litio que posee una capacidad de 2000 mAh para responder a una autonomía de 120 h de funcionamiento continuo.

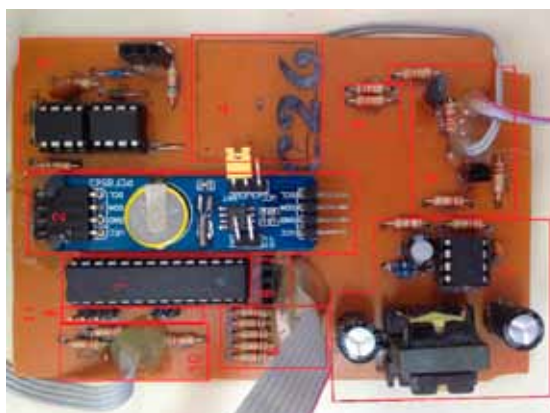
Se diseñó una fuente conmutada de tensión a partir del integrado MC34063 que permite adaptar la tensión entregada por la batería (3,7 V) a la utilizada por el microcontrolador y los sensores (3,3 V).

Se seleccionó y programó una pantalla LCD de 84x84 líneas que otorga al operario la capacidad de visualizar los datos medidos y calculados, así como se evolución en función del tiempo.

El microcontrolador usado en el prototipo tiene configuraciones modificadas con respecto al traído de fábrica. Los fuses fueron cambiados para que el ATMEGA-328PU funcione con un oscilador interno de 8Mhz en vez de 16Mhz, modificación ocasiono que pase de consumir de 29mA a

11mA y obtener así una mayor autonomía.

En la Fig.1 se observa la placa impresa con los componentes los puntos de conexión de cada uno de los sensores.



*Figura 1: Circuito desarrollado para implementación del medidor. 1) Microcontrolador, 2) Real Time Clock, 3) Etapa de amplificación, 4) Sólculo de SD, 5) Resistencias y flex para la pantalla, 6) Conector DHT22, 7) Fuente conmutada, 8) Encendido, 8) Medidor de batería, 9) botones de comando, 10) puerto serial.*

### *Adquisición de datos.*

El medidor desarrollado, antes de comenzar la adquisición de datos, realiza una comprobación general de estado del sistema, a seguir, realiza la medición de cada sensor. Este último procedimiento se repite 5 veces, lee la hora actual almacenada en el RTC y luego presenta los valores medidos el LCD y los almacena en la tarjeta SD. Finalmente, si no se selecciona el modo automático de toma de datos entra en modo de bajo consumo esperando 5 minutos para realizar el siguiente proceso de medición.

Este Procedimiento se realiza con la finalidad de ahorra energía y aumentar la autonomía del instrumento.

### *Tratamiento de datos*

Los valores medidos y almacenados en la tarjeta SD pueden ser cargados y visualizados. Se ha desarrollado e instalado en el microprocesador un programa que tiene la capacidad de presentar directamente, sobre el *display* e 84x84 líneas los datos medidos en forma instantánea y agrega la posibilidad de presentar gráficamente los datos medidos e índices calculados en función del tiempo para observar su variación visualizar en función de tiempo la variable medida seleccionada.

En la Fig. 2 a) se presenta una foto del equipo desarrollado y en la Fig. 2 b) su utilización en un caso práctico.

En el cuerpo principal del medidor se encuentran los componentes electrónicos, la pantalla y la batería, además de los botones e comando y los terminales de conexión para los diferentes tipos de sensores. El equipo es completamente digital, la unidad central de procesamiento es un microcontrolador Atmega 328P (Atmel, 2014) al que se le conectan todos los dispositivos.



*Figura 2 – a) Medidor de irradiancia, de Humedad y de Temperatura conectado al instrumento desarrollado b) foto tomada durante la aplicación práctica del instrumento multipropósito desarrollado.*

### *Ajuste de señales analógicas*

En la medición de la irradiancia solar global y la radiación fotosintéticamente activa, como se mencionó antes, se usó fotodiodos BPW34 y un fotodiodo BPW21 respectivamente, cada sensor se conecta una resistencia shunt de  $100\Omega$  y posee un difusor que reduce el valor de irradiancia que llega al fotodiodo. Esta situación ocasiona que la medida de irradiancia sea proporcional a una diferencia de poten-

cial menor a 11,0 mV. Es decir, es necesario implementar una etapa amplificadora que permita aprovechar el rango de medida analógica del microcontrolador.

Por lo expuesto se diseñó una etapa amplificadora, para la cual se procedió a conectar la resistencia shunt a un operacional en configuración seguidor, para separar etapas, luego la salida del seguidor se conecta un amplificador con ganancia 10 combinado con un filtro pasa bajo de primer orden. De

la salida de este último amplificador se conecta otra etapa de amplificadora también con ganancia 10, para tener una ganancia de 100. De esta forma la etapa amplificadora permite obtener rangos de 0 a 1,1V.

## RESULTADOS

Se verificó el comportamiento individual de cada sensor, la estabilidad de la fuente desarrollada y del instrumento completo a través de su Calibración y Contraste.

### *Calibración del sensor de temperatura y humedad*

Para la calibración del sensor de humedad se realizó el procedimiento siguiendo las recomendaciones dadas por la Norma ASTM E 104 – 2 “El mantenimiento de la humedad relativa constante por medio de soluciones acuosas” (ASTM International, 2002). Así mismo se tuvieron en cuenta las instrucciones de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) en su recomendación internacional OIML R 121 “La escala de humedad relativa de aire certificada con soluciones de sales saturadas” (OIML, 1996).

Se realizaron tres series de mediciones para cada una de las 6 soluciones de sales a 25 °C. Según nota técnica interna del GER-UNNE (Restrepo, 2016)

El sensor de temperatura DS18B20 fue contrastado contra un termómetro Testo 735 con sonda Pt100 calibrada, utilizando un baño térmico controlado electrónicamente (Poletto *et al*, 2015). El sensor AM 2302 fue introducido en un bloque de aluminio junto con el sensor patrón y se aseguró en adecuado contacto entre sensores y bloque de aluminio

a través de pasta térmica. Este procedimiento se realizó debido a que el encapsulado del DHT22 no es a prueba de agua.

La diferencia entre valores medidos con el sensor AM2302 y los de referencia para el rango de trabajo entre 40 y 97% de HR fue menor al 1,7%. Obteniéndose un valor de R2 igual a 0,9995, verificando la precisión en la medida de HR.

La diferencia entre valores medidos con el sensor DS18B20 y los de referencia para el rango de trabajo entre 5 y 70°C fue menor al 0,1%. Con una incerteza de 1%, una correlación que alcanzó el valor unitario, verificando la precisión de la medida de temperatura

### *Calibración del sensor de irradiancia global*

La calibración de piranómetros se realiza por comparación directa en el exterior con un piranómetro de referencia, teniendo en cuenta la norma ISO-9060

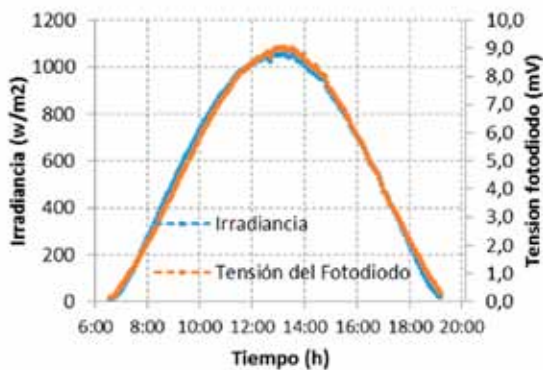
Se colocó el sensor patrón de irradiancia Kipp and Zonen CPM22 junto al sensor a fotodiodo a calibrar sobre la misma superficie, se los posicionan con una inclinación con respecto a la horizontal calculada para que al medio día solar la incidencia de la radiación directa sea de forma perpendicular y, además, los sensores se posicionan orientados hacia el norte.

Seguidamente los sensores se conectan a un instrumento adquisidor de datos marca Rigol DM3064 de 6 y ½ dígitos en modo de voltímetro.

Obtenidos los datos, se calcula el coeficiente de correlación correspondiente y con la regresión lineal, se ajustan

ta los coeficientes de calibración a través de software en el medidor portátil.

En la Fig. 3 a) se presentan los valores de irradiancia, a lo largo de un día, medidos



utilizando el instrumento patrón, valores corregidos teniendo en cuenta la variación de temperatura interna, así como los valores, en mV medios a la salida del fotodiodo.

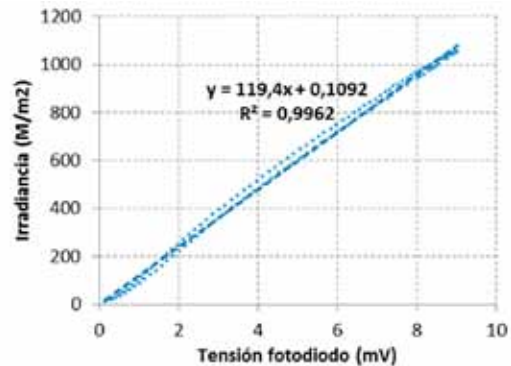


Figura 3: a) valores medidos a lo largo del día por los piranómetros térmico y de fotodiodo, b) Correlación entre valores de ambos piranómetros.

En la Figura 3 b) se tiene la correlación entre ambos medidores de irradiancia. Se observa que existe un desvío en las medidas relacionada con una diferencia de respuesta angular entre los piranómetro, situación a ser evaluada en otros estudios. A través del análisis de los resultados obtenidos se observa que el piranómetro con fotodiodo tiene una adecuada respuesta con respecto al Kipp and Zonen, presentando desvíos menores al 3% respecto a los valores de irradiancia, corregidos por temperatura, obtenidos del K&Z. Es importante destacar que los mayores desvíos se producen para valores de irradiancia menores a 200 W/m<sup>2</sup>. Las incertezas máximas determinadas para la medición de irradiancia son del orden del 5,3% en el rango de 200 a 1000 W/m<sup>2</sup>, para la medida de temperatura es de 0,4 °C en el rango de 5 a 70 °C y para la Humedad del orden del 1,6% para el rango de 40 % a 97% de HR.

## CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño, implementación y calibración de un medidor portátil de irradiancia, PAR, temperatura y humedad, así como de todos los componentes que forman parte del sistema. El instrumento desarrollado se realizó con el objetivo de disponibilidad un instrumento multipropósito que sea adecuado para evaluaciones energéticas solares para diferentes tipos de aplicaciones. De esta forma, se proyectó y construyó un instrumento con dispositivos accesibles en el mercado nacional, que cumple con las normativas nacionales, de bajo costo, autónomo y portátil.

Las incertezas máximas permiten afirmar que el instrumento cumple con la precisión esperada para un medidor portátil.

Considerando la importancia de la ca-

racterización del recurso solar y de variables climáticas para evaluación de aprovechamientos energéticos, o para evaluación térmica de los ambientes de trabajo, se presenta al instrumento desarrollado como una posible herramienta para el análisis y futura adaptación infraestructural a las circunstancias bioclimáticas adecuadas para lograr condiciones de confort térmico.

### ABSTRACT

*This paper describes the design, implementation and calibration of a irradiance, PAR, temperature and humidity portable meter, as well as all the components forming part of the system. The instrument has been developed in*

*the Renewable Energy Group (GER) of the National University of the Northeast. It contains digital sensors to measure relative humidity and ambient temperature analog sensors to determine the value of the irradiance and PAR. It is portable, has a autonomy of 5 (five) days, a display that show the measured variables and recording data on an SD card fulfilling the function of datalogger. Together we have developed a software for reading and representation in a display of the measured variables versus time. At this stage of the investigation it has a functional prototype calibrated late stage experimental trials.*

**Keywords:** instrumentation, solar energy, datalogger.

### REFERENCIAS

- ASTM International. (2002). ASTM E 104 - 2 Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. ASTM International.
- Atmel, <http://www.atmel.com/devices/atmega328.aspx>, accedido 05/2015.
- Bolzi, G. (2000). Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA Grupo de Energía solar-Departamento de Física-Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Kipp & Zonen (2005). Instruction manual Silicon Pyranometer SP LITE.
- Luque, A. Hegedus, S. (2011). Handbook of photovoltaic science and engineering. Wiley.com,
- OIML. (1996). OIML R 121 The scale of relative humidity of air certified against saturated salt solutions. Internationale Organization of Legal Metrology.
- Poletto, G., Caceres, M., Busso, A. Desarrollo De Un Sistema Automatizado Para La Calibracion De Sensores De Temperatura. UNNE - XXI Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas - 2015.
- Restrepo, L. (2016). Calibración Sensores De Humedad Am2302 Y Sht75 Con Placa Arduino. Comunicación técnica Interna. Grupo en Energías Renovables-UNNE. Corrientes.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2005). Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, provincia de Buenos Aires. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 9, 11-01.
- Righini, R., & Aristegui, R. (2013). Análisis de datos de la red solarimétrica pampeana. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 1, 1137-1146.
- Rigol DM-3064. (2007). Dm3000 series digital multimeter user's guide.
- Sensirion, <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature>, accedido 05/2015
- Vera, Luis H., Benitez, F. (2005). "Piranómetro Fotovoltaico con Sistema Autónomo de Adquisición de Datos" XXVIII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), Neuquen, Argentina.
- Zanescio, I. (1991), Analise e Construção de um Piranómetro Fotovoltaico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.