



*Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación
Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 4, pp. 08.231-08.240, 2016. Impreso en la Argentina.
ISBN 978-987-29873-0-5*

DESARROLLO DE UN MEDIDOR PORTATIL DE IRRADIANCIA, PAR, TEMPERATURA Y HUMEDAD

L. Vera¹, C Cuestas², A. Firman¹, M Cáceres¹, A Busso¹
GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.
Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.
Tel./Fax: (0379) 4473931 int 116, e-mail: lhvera@ger-unne.com.ar

Recibido 14/08/16, aceptado 11/10/16

RESUMEN: En este trabajo se presenta el diseño, implementación y contrastación 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 contrastado 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 a través de dispositivos fotovoltaicas, la conversión en energía térmica para el calentamiento de agua o generación de energía, su utilización para el crecimiento de cultivos o su regulación con fines de evitar cargas térmicas con el fin de minimizar la energía de refrigeración. Es decir, el aprovechamiento o impedimento de la energía solar posee varias vertientes según el tipo de aplicaciones específica con la que se trabaja.

Para cualquiera de los caso antes mencionados una medida adecuada de la radiación solar y algunas variables climáticas es esencial para la adecuada elección, orientación y evaluación de capacidades energéticas de módulos fotovoltaicos, evaluar el crecimiento de cultivos energéticos, realizar una adecuada orientación de techos y de grandes superficies de captación solar, aplicar estrategias pasivas de confort térmico, etc.

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 ingles 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 fue llevada 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

¹ Investigador Grupo en Energías Renovables – UNNE.

² Becario Grupo en Energías Renovables – UNNE.

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.

ETAPAS DE DESARROLLO

Las etapas realizadas para cumplir el objetivo planteado se describen a seguir:

- Determinar el hardware necesario para la construcción del medidor portátil.
- Desarrollar medidor de irradiancia y PAR.
- Diseñar y construir los circuitos de etapa de amplificación de los sensores de radiación solar y PAR.
- Implementar sensor de temperatura y humedad, pantalla LCD, reloj de tiempo real (RTC), botones y medidor de baterías.
- Diseñar fuente conmutada.
- Agregar cargador de baterías.
- Desarrollar un software para el microcontrolador.
- Ensayar etapa de amplificación y fuente conmutada.
- Contrastar cada sensor y realizar ajustes necesarios a cada etapa.
- Implementar el sistema en un gabinete portátil

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. En el cuerpo principal 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.

SELECCIÓN DE SENSORES

Por lo expuesto, se planteó el desarrollo de un medidor portátil de radiación solar, PAR, temperatura y humedad, a seguir se describen los sensores utilizados.

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).

Pirómetros térmicos: Los piranómetros térmicos (o de termopilas) son los instrumentos por excelencia utilizados para cuantificar la radiación solar. Estos instrumentos están constituidos por un disco negro cubierto por una cúpula de cristal o cuarzo simple o doble. El disco absorbe toda la luz solar que se transmite a través de la cúpula. Cuando estos instrumentos reciben la luz del sol se calienta una superficie de color negro que produce un aumento de temperatura en dicha superficie, situación que se traduce en una señal de tensión que es directamente proporcional a la irradiancia.

Los piranómetros están especialmente diseñados para captar la luz desde todos los ángulos, tener una respuesta plana para todas las longitudes de onda hasta 2500 nm (longitud de onda donde el cuarzo de la cúpula disminuye su transmitancia) y proporcionar una salida estable independientemente de las condiciones de nubosidad y cambios de las condiciones ambientales (Figura 1). Los piranómetros térmicos primarios y secundarios son instrumentos muy estables cuyos precios son más altos que los medidores que utilizan dispositivos FV (fotodiodo o celda). Típicamente, los piranómetros deben ser recalibrados aproximadamente una vez al año, ya que la tensión de salida puede presentar desvíos con el tiempo de exposición debido a la degradación de la superficie negra.

Piranómetros FV: el principio de funcionamiento se basa 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 un corriente de corto circuito proporcional al valor de irradiancia. Los fotones con energía por encima del gap (Luque y Hegedus, 2011) se convierten directamente en las cargas positivas y negativas que pueden ser recogidas y utilizada en un circuito externo, es decir, trabajan sobre un determinado rango del espectro solar y su respuesta no es plana (Figura 1). La celda FV (o fotodiodo) genera una corriente que depende de la cantidad y la distribución espectral de los fotones, por esta los valores de corriente se encuentran afectados por las variaciones en la distribución espectral causado por nubes, vapor de agua, aerosoles, masa de aire, etc, (Iqbal, 1983; Osterwald, 1986). En general, 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). La señal de tensión medida es proporcional a la irradiancia.

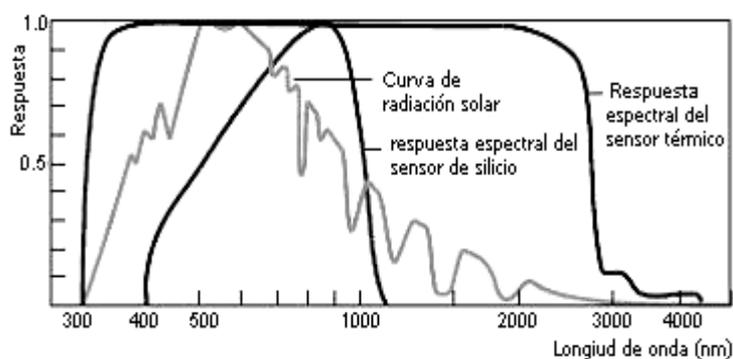


Figura 1: Curvas normalizadas mostrando la respuesta espectral de un sensor de silicio, un sensor térmico y el espectro solar a nivel del mar (Kipp & Zonen, 2005).

Al igual que el módulo fotovoltaico un fotodiodo responde a la luz desde todos los ángulos, pero presenta una mayor reluctancia y, por lo tanto, una disminución de la eficiencia para ángulos bajos de incidencia. 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 de 6 mm de espesor. Esta cobertura permite independizar parcialmente el valor de la radiación solar del ángulo de incidencia.

La cobertura debe difundir homogéneamente la radiación solar que a ella llega y ser resistente a los rayos UV, es por esta razón que se utilizó el teflón, que cuenta con ambas características. Al fotodiodo BPW34 se conecta una resistencia *shunt* de 100Ω que provocará, en sus terminales, una caída de tensión próxima al 10% del valor de la tensión de circuito abierto (Zanenco, 1991), obteniéndose una señal de salida que varía entre 0 y 50 mV. Este procedimiento es realizado para garantizar la proporcionalidad del valor de tensión medido respecto a la radiación solar recibida por el sensor. El medidor de irradiancia desarrollado es presentado en la Fig. 2.



Figura 2: Foto del Piranómetro fotovoltaico construido.

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 existen sensores desarrollados a tal efecto, como el LI-190SA fabricado por LI-COR, y el PAR Lite, de la empresa KIPP & ZONEN. En ambos casos se utiliza como sensor un fotodiodo de silicio al que se modifica su respuesta y se le agrega 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 igual al explicado para el medidor de irradiancia. La señal de salida varía entre 0 y 40 mV.

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. Además, que se comunica en forma digital con el microcontrolador, utilizando protocolo *OneWire*.

El sensor de humedad relativa implementado usa tecnología de medición capacitivo. Para este principio, el elemento sensor está construido de un condensador de película en diferentes sustratos (vidrio, cerámica, etc.). 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, que se mide por un sistema electrónico a bordo del circuito.

La medición de humedad relativa tiene una precisión de $\pm 1,8\%$ HR con una resolución de 12bits en un rango entre 10 a 90% HR. Para el rango de temperatura, de 10 a 40 °C, posee una precisión de $\pm 0,3$ °C, con una resolución de 14bits. (Sensirion, 2011). Dicho sensor 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, y se comunica con el microcontrolador mediante el uso del protocolo I²C.

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. Estos mismos datos, junto con la hora y fecha, se guardan cada 5 minutos en un archivo correspondiente al día de medición dentro de la tarjeta SD, siendo el valor almacenado un promedio de 150 mediciones. Este intervalo de tiempo puede ser ajustado según la necesidad del usuario, guardando datos hasta en intervalos de un en un segundo.

El microcontrolador usado en el prototipo tiene configuraciones modificadas con respecto al traído de fábrica. Los fusos fueron cambiados para que el ATMEGA328PU 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. Otras de las modificaciones que se realiza en el microcontrolador es usar la referencia interna de 1,1V para las entradas analógicas, de esta manera el ADC de 10bits mejora la resolución de la lecturas analógicas, pasando de tener de una resolución de 3,3V/1024 a 1,1V/1024, con el propósito de mejorar la calidad de las lecturas de los fotodiodos.

En la Fig.3 se observa la placa impresa con los componentes los puntos de conexión de cada uno de los sensores.

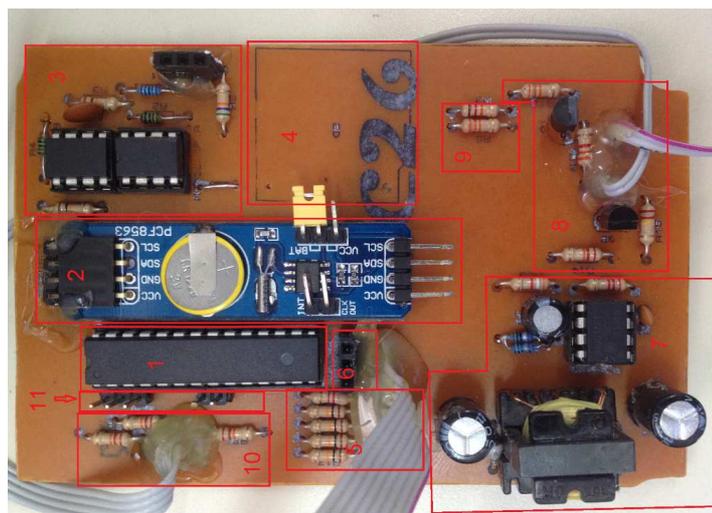


Figura 3: Circuito desarrollado para implementación del medidor.

La Fig. 3 muestra una la placa desarrollada con una división por bloques. A seguir se detalla la función que cumple cada uno de estos bloques.

1. Microcontrolador ATMEGA328PU.

2. *Real Time Clock* PCF8563.
3. Etapa de amplificación.
4. Sócalo de SD, por ser de montaje superficial, se encuentra del lado de atrás.
5. Resistencias y flex para la pantalla de 84x84 líneas.
6. Conector para el DHT22.
7. Fuente conmutada.
8. Encendido y apagado del equipo.
9. Medidor de batería.
10. Resistencia pull-up y flex de los botones de comando.
11. Pines para el acceso del puerto serial.

Adquisición de datos.

El medidor desarrollado, antes de comenzar la adquisición de datos, realiza una comprobación general de estado del sistema, asegurando que la batería posea carga, que todos los sensores estén conectados y que la tarjeta SD se encuentre presente. Posteriormente, se realiza la medición de cada sensor; procedimiento que se repite 5 veces y obtiene la hora actual almacenada en el RTC. El paso siguiente es presentar los valores medidos e índices calculados en el LCD y almacenarlos 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 ahorrar 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. 4 a) se presenta una foto del equipo desarrollado y en la Fig. 4 b) su utilización en un caso práctico.



(a)



(b)

Figura 4: 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 100Ω 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 potencial 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.

El sensor de irradiancia y de PAR, ambos utilizan un cable bipolar cubierto por una malla metálica con un conector macho RJ11 como puerto de entrada y son instalados en el mismo puerto en el equipo. El medidor de PAR posee un divisor resistivo para que el microcontrolador diferencie que tipo de sensor (PAR o irradiancia) está conectado. Luego, en placa, se encuentra un conector hembra RJ11 la resistencia *shunt*, el operacional seguidor, filtro pasa bajos, amplificadores y el microcontrolador.

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. A continuación se describirá el procedimiento y resultados de los ensayos de la fuente conmutada, etapas de amplificación y también los procedimientos para la calibración y contraste de los sensores.

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 prepararon soluciones saturadas de las sales, grado analítico, presentadas en la Tab. 1

Nombre de la sal	Denominación	HR a 25 °C (%)
Cloruro de Litio	LiCl	11.3 ± 0.2
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	32.8 ± 0.2
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	43.2 ± 0.4
Bromuro de sodio	NaBr	57.6 ± 0.3
Cloruro de sodio	NaCl	75.3 ± 0.1
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₃	97.3 ± 0.4

Tabla 1: Nombre y denominación de las sales grado analítico con su correspondiente humedad relativa e incerteza asociada. Fuente: (ASTM International, 2002)

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.

En la Fig. 5 se observan las curvas de calibración y el ajuste logrado.

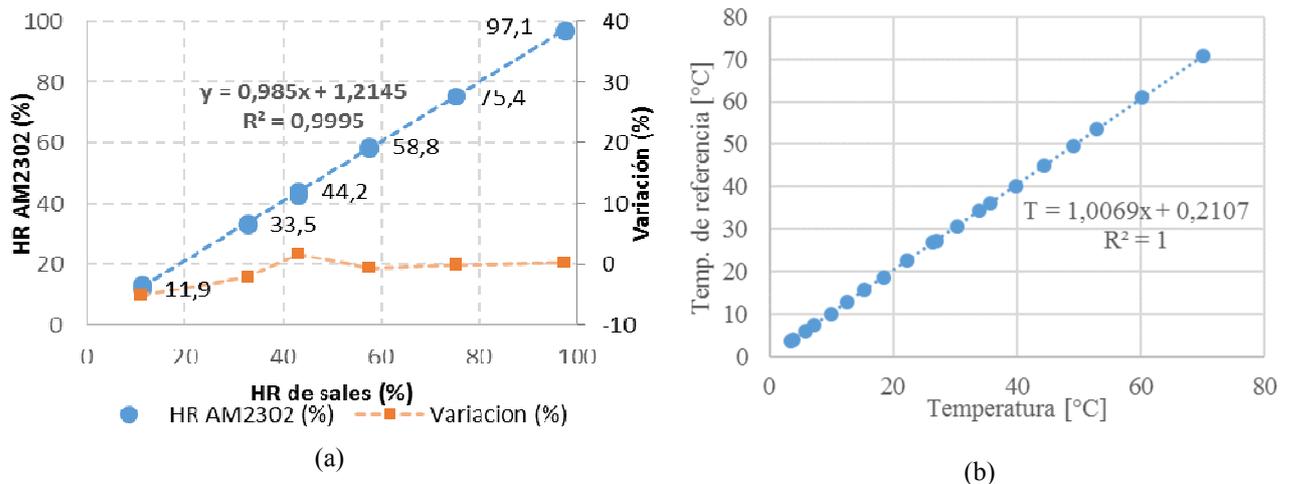


Figura 5: Curva de contraste y ajuste logrado entre los sensores. A) Humedad Relativa, b) Temperatura

Para verificar el contraste se procedió a graficar la humedad relativa del sensor en el eje y , y se graficaron los valores humedad relativa de cada una de las sales en el eje x la. Este procedimiento fue repetido para 3 (tres) ensayos a 25 °C. 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 R^2 igual a 0,9995, verificando la precisión en la medida de HR.

Para encontrar la recta de calibración del sensor de temperatura se graficaron los valores medidos en el eje y , y los valores del medidor patrón en el eje x . Este procedimiento fue realizado para todo el rango de trabajo del sensor. 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.

Ensayos de la Fuente Conmutada:

Se realizaron 3 tipos de ensayos a la fuente conmutada, el primero es determinar el rendimiento de la fuente, el segundo es un ensayo sobre regulación de carga y el tercer ensayo es observar el rizado de la tensión de salida de la fuente de alimentación.

Para el rendimiento de la fuente conmutada se obtuvo a través de la medición de la potencia de entrada y salida. Se alimentó a la fuente desarrollada a través de una fuente lineal variable SIGLENT SPD3303S, la cual fue previamente contrastada con una fuente KEPCO M36-12. Esta fuente controlada cuenta con un amperímetro y voltímetro de la cual se obtiene la potencia de entrada.

A la salida de la fuente desarrollada se conectó un multímetro FLUKE 289 en modo de amperímetro (escala 20mA CC) y otro multímetro FLUKE 297 en modo de voltímetro (escala 20V). Con los valores indicados en los medidores, y con la potencia de entrada obtenida desde los medidores de la fuente lineal, se realiza la relación de potencias determinando que el rendimiento de la fuente conmutada es del 86%.

El ensayo regulación de carga de la fuente conmutada consiste en evaluar el valor de tensión de salida para diferentes condiciones de entrada. En la Fig.6 a) se observa que para diferentes valores de tensión de entrada el valor de la tensión de salida se mantiene, en casi todo el rango de trabajo (3,3V). De lo expuesto se concluye que la regulación de fuente conmutada es aceptable, ya que cumple con los requisitos propuestos de tener una variación menor al 3%.

Ensayo de la etapa amplificadora

En la entrada de la etapa amplificadora se conecta la fuente SIGLENT SPD3303S, y en la salida de la etapa se conecta un multímetro FLUKE 289 en modo voltímetro. Se realizan variaciones de tensión en

la fuente SIGLENT entre el rango de 0 a 11mV y en cada variación se toma lectura de la tensión en la etapa de salida a través del multímetro FLUKE 289.

En la Fig. 6 b) se presentan los valores obtenidos durante el procedimiento de evaluación del rendimiento de la fuente conmutada.

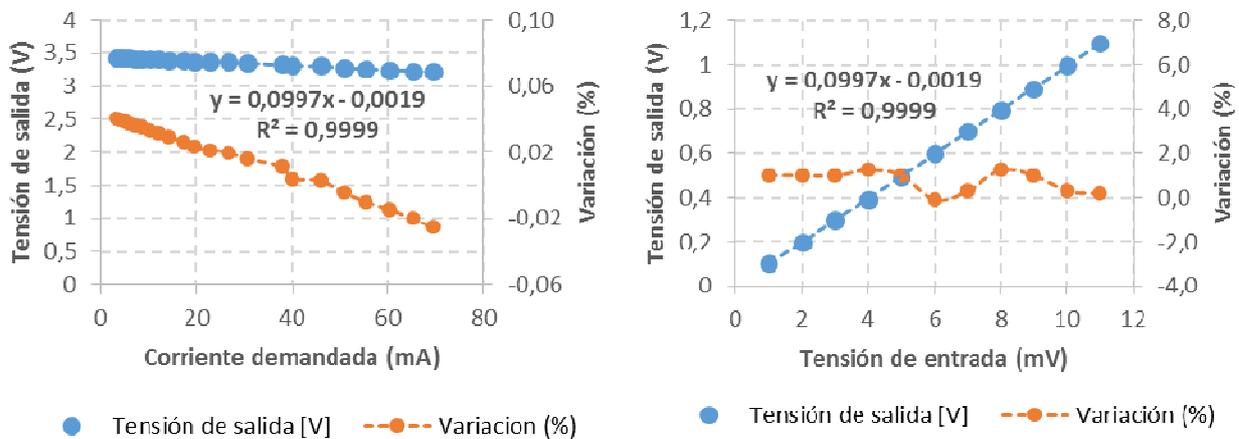


Figura 6 – Curva de tensión de salida y variación de a) regulación de la fuente conmutada para diferentes estados de carga, b) amplificación de la señal de sensores analógicos.

En la Fig. 6 b) se observa cómo se mantiene la linealidad con la variación de los valores de tensión en la entrada del circuito cumpliendo con la ganancia esperada y con variaciones menores al 2%.

Contrastación del sensor de irradiancia global

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

Se colocaron el sensor patrón de irradiancia Kipp and Zonen CPM22 junto al fotodiodo encapsulado a contrastar (ambos 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 en modo de voltímetro (cada canal con la escala adecuada). El Kipp and Zonen utiliza 2 canales del Rigol, uno es usado para medir la irradiancia y el otro para medir la señal del termistor que posee el instrumento para realizar compensación por temperatura. El sensor del fotodiodo se conecta a un canal del Rigol en paralelo con al medidor portátil desarrollado.

El ensayo fue realizado en el mes de octubre en un día soleado a partir de las 6 am aproximadamente. Los valores son medidos cada minuto y se almacenan en el Rigol y en el medidor desarrollado cada 5 minutos. El ensayo se realizó hasta las 19 h. aproximadamente.

Obtenidos los datos, se calcula el coeficiente de correlación correspondiente y con la regresión lineal, se ajusta los coeficientes de contraste a través de software en el medidor portátil.

En la Fig. 7 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 (instalado en el soporte de aluminio con la correspondiente cobertura difusora y shunt de 100 ohm). En la Figura 7 b) se presenta la correlación entre ambos medidores de irradiancia (el de referencia y el desarrollado)

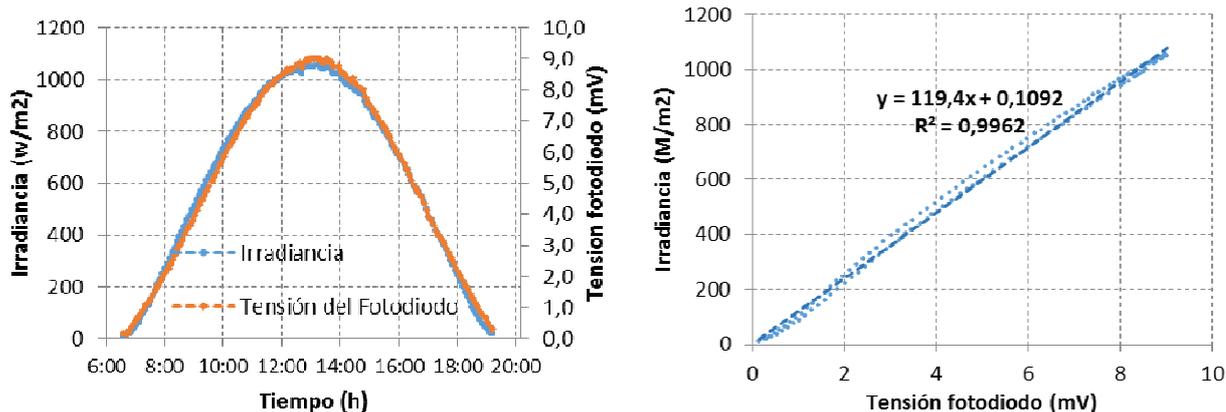


Figura 7: a) Irradiancia global medida, a lo largo de un día, por el piranómetro térmico y el fotodiodo, b) Correlación entre valores de ambos piranómetros.

Se observa que existe un desvío en las medidas relacionada con una diferencia de respuesta angular entre los piranómetros, situación a ser evaluada en otros estudios. A través del análisis de los resultados obtenidos se observa que el piranómetro con fotodiodo tiene una excelente 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^2 .

La contrastación del sensor de PAR no fue realizada ya que no fue posible conseguir un medidor de PAR patrón.

Las incertezas máximas determinadas para la medición de irradiancia son del orden del 5,3% en el rango de 200 a 1000 W/m^2 , para la medida de temperatura es de $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ en el rango de 5 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 contrastación de un medidor portátil de irradiancia, PAR, temperatura y humedad, así como de todos los componentes que forman parte del sistema. Dicho instrumento fue desarrollado por el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FaCENA-UNNE). 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.

El sistema desarrollado consta básicamente de un microcontrolador que recibe los valores de irradiancia o PAR, temperatura y de humedad relativa, estos valores medidos y calculados son mostrados a través de una pantalla grafica que permite ver los valores instantáneos, así como su evolución en función del tiempo. La construcción del medidor es compacta y consta de dos entradas una para medir humedad y temperatura y la otra para medir irradiancia o PAR. Los sensores instalados en el instrumento fueron contrastados previamente frente a instrumentos de referencia; exceptuando el medidor de PAR.

Las incertezas máximas determinadas para la medición de irradiancia son del orden del 5,3% en el rango de 200 a 1000 W/m^2 , para la medida de temperatura es de $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ en el rango de 5 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y para la Humedad del orden del 1,6% para el rango de 40% a 97% de HR. Estos valores permiten afirmar que el instrumento cumple con la precisión esperada para un medidor portátil. Además, cabe destacar su autonomía, la posibilidad de mostrar en tiempo real diferentes variables y de almacenar las mismas.

Considerando la importancia de la caracterización 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.

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.
- Iqbal, M., (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. Canadá.
- 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.
- Osterwald, C. (1986). Translation of device performance measurements to reference conditions. Solar cells, 18(3):269–279.
- 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, v16, 11.09, 11.01.
- Righini, R., & Aristegui, R. (2013). Análisis de datos de la red solarimétrica pampeana. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v24, 11.37-11.46.
- 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" Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v16, 8.7 – 8.12.
- Zanescio, I. (1991), Analise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

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. Was developed a software for reading and representation in a display of the measured variables versus time. At this stage the GER-UNNE has a functional prototype calibrated in experimental stage.

Keywords: instrumentation, solar energy, datalogger.