

Solarímetro Digital Aplicado a Instalación Piloto de Paneles Solares Fotovoltaicos

Ing. Leonardo Depetris¹
leodepetris@gmail.com

Mg. Ing. Gastón Peretti¹
gastonperetti@gmail.com

¹Grupo de Investigación y Desarrollo Electrónico (GIDE)
Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco.

Ing. Daniel Musso²
ingdanielmusso@gmail.com

Mg. Ing. Diego Ferreyra²
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

²Grupo de Investigación sobre Energía (GISEner)
Departamento de Ingeniería Electromecánica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco.

Resumen —

Este proyecto se encuentra dentro de una línea de investigación enfocada en energía solar fotovoltaica. La Facultad Regional San Francisco posee desde el 2015 una instalación que consta de 12 paneles de 235 W de potencia nominal, conectados a la red eléctrica a través de un inversor de 2800 W de potencia nominal. Por su carácter de instalación piloto, inyecta esta energía generada por medios fotovoltaicos (unos 4000 kW·h anuales) a la red interna de la Facultad. Si bien se cuenta con datos periódicos proporcionados por el software del fabricante del inversor, resta anexar a tales registros la medición de la radiación solar que impacta sobre la superficie de los paneles, siendo esto último el enfoque principal de este estudio.

Se plantea el desarrollo de un prototipo de medición de radiación solar (solarímetro), utilizando celdas fotovoltaicas calibradas. También se incluye en dicho desarrollo la medición de parámetros útiles para el mantenimiento de los paneles, entre ellas, la temperatura del panel. Debido a que se requiere cotejar la información obtenida con los datos provenientes del software del fabricante, se plantea una interfaz en Labview, concentrando el monitoreo de datos desde una PC.

Palabras clave: *energía solar, paneles fotovoltaicos, piranómetros fotovoltaicos, sensores, amplificadores de instrumentación, comunicación serie RS485*

I. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, se manifiesta preocupación por mitigar los efectos negativos relacionados con el desarrollo tecnológico de estos tiempos. A nivel mundial, una muestra de esto lo constituyen los documentos y compromisos generados en numerosos encuentros organizados por la ONU en las últimas décadas. Como ejemplo reciente, puede citarse la Cumbre de la Tierra realizada en 2016 en Marruecos: en este evento, se ratificaron y ampliaron compromisos generados en instancias

anteriores para reducir la emisión de gases de efecto invernadero [1]. Uno de los puntos más relevantes relacionados con este compromiso es la necesidad de desarrollar proyectos para la generación de energía eléctrica por medios renovables.

Argentina, uno de los países que adhirió a estos compromisos, viene trabajando sobre un marco legal para implementar ordenadamente tales medios de generación en todo el territorio nacional. Existen algunas normativas precursoras en algunas provincias y jurisdicciones, pero existe la necesidad de unificar su diversidad en un cuerpo normativo de alcance nacional. En ese sentido, ya en su momento la ley 27191 estableció una serie de metas para los próximos años a fin de implementar medios renovables de generación de energía eléctrica [2]. Esta ley, como la mayor parte de la normativa legal y técnica relacionada, se orienta específicamente a la denominada generación distribuida. La generación distribuida consiste en la tendencia de que la energía eléctrica se genere en el punto más cercano posible a su punto de consumo, por medio de equipos de generación cuya potencia nominal sea pequeña en términos relativos con respecto a la red de distribución a la que se interconectan.

En 2013, y en previsión de esta coyuntura actual, la Facultad Regional San Francisco de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRSFco) adhirió al proyecto IRESUD [3], de alcance nacional. Este proyecto, financiado por el FONARSEC [4], es gestionado por un consorcio público-privado específico con los objetivos de expandir la implementación de instalaciones piloto de energía solar fotovoltaica con conexión a red. La instalación monofásica implementada en 2015 en la UTN-FRSFco a través de IRESUD consta de 12 paneles de 235 W de potencia nominal, conectados a la red a través de un inversor de 2800 W de potencia nominal [5-6]. Por su carácter de instalación piloto, inyecta esta energía generada por medios fotovoltaicos (unos 4000 kW·h anuales) al cableado interno del edificio principal del campus de la UTN-FRSFco. Cubre unos 20 m², resulta visible desde el frente del edificio principal y está accesible

Trabajo financiado por medio de los Proyectos de Investigación y Desarrollo ENUTNSF0003648, ENTUIME0004313TC y ENUTNSF0004472, homologados por Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional.

para el acceso del público en general, mediante visitas guiadas por docentes y estudiantes. (Fig. 1 y Fig. 2).



Fig. 1. Instalación piloto de 12 paneles fotovoltaicos



Fig. 2. Vista de los paneles desde el patio de la UTN-FRSFco

Desde el inicio de la operación de esta instalación, se han recabado numerosos datos a partir del *software* proporcionado por el fabricante del inversor [7-8]. Hasta ahora, aunque se cuenta con más datos, se ha prestado especial atención a los valores de generación en corriente alterna, que se comenzaron a cotejar desde 2016 con un contador de energía electrónico con capacidad de telemetría. Tales datos han permitido conocer información valiosa, como la generación diaria,

semanal, mensual o anual de la instalación y los distintos perfiles de variación horaria de la potencia de generación inyectada a la red. Con el relevamiento de estos datos en períodos de integración de 3 minutos, se cuenta con una descripción a un nivel bastante detallado del comportamiento de la instalación en función de las variaciones climáticas de cada día [9]. En la Fig. 3, se muestra el tablero con el inversor y la oficina de relevamiento de datos.



Fig. 3. Inversor y oficina de relevamiento de datos

Solamente restaría anexar a tales registros la medición de la radiación solar que impacta sobre la superficie de los paneles en los mismos períodos de 3 minutos, además de la medición de la corriente continua proporcionada por los paneles (actualmente, se cuenta solamente con la medición de la tensión de continua). De esta manera, se contaría con suficiente información como para evaluar de manera más integral el desempeño de la instalación en lo que hace a eficiencia de la conversión de energía solar a energía de corriente continua y de la conversión de corriente continua a corriente alterna. Esta información completaría el panorama de validación de información a nivel regional que ha proporcionado esta instalación piloto, ya que constituye una experiencia valiosa en sí por ratificar los parámetros de funcionamiento teóricos para una instalación solar fotovoltaica conectada a red en la provincia de Córdoba.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Por lo expuesto, esta etapa del proyecto se centra fundamentalmente en la medición del nivel de radiación solar que incide en los paneles. Comúnmente, para la medida de radiación solar se utilizan diferentes instrumentos que permiten obtener información de la radiación incidente directa (piranómetro) y la radiación difusa (piranómetro con banda de sombra) [10]. A su vez, resulta útil el dato de la temperatura a la que se encuentran los paneles y de las condiciones climáticas en las que se encuentran dado que incide directamente en su eficiencia en la generación de corriente continua.

Se propone un esquema como el mostrado en la Fig. 4, que cuenta con dos sensores fotovoltaicos que serán usados como

solarímetros (cada uno con una ganancia de amplificación diferente y así ponderar el cálculo entre luz incidente directa y difusa), un circuito integrado LM35 que cumplirá la función de medir la temperatura de los paneles por contacto directo y un sensor DHT22 que determine las condiciones ambientales de temperatura y humedad. Se utiliza un microcontrolador PIC 18F2550 y como elementos de salida de información se cuenta con una pantalla LCD en un tablero ubicado cerca de los paneles y una interfaz en PC mediante una comunicación serie RS485, por cuestiones de distancia.



Fig. 5. Celdas fotovoltaicas calibradas utilizadas.

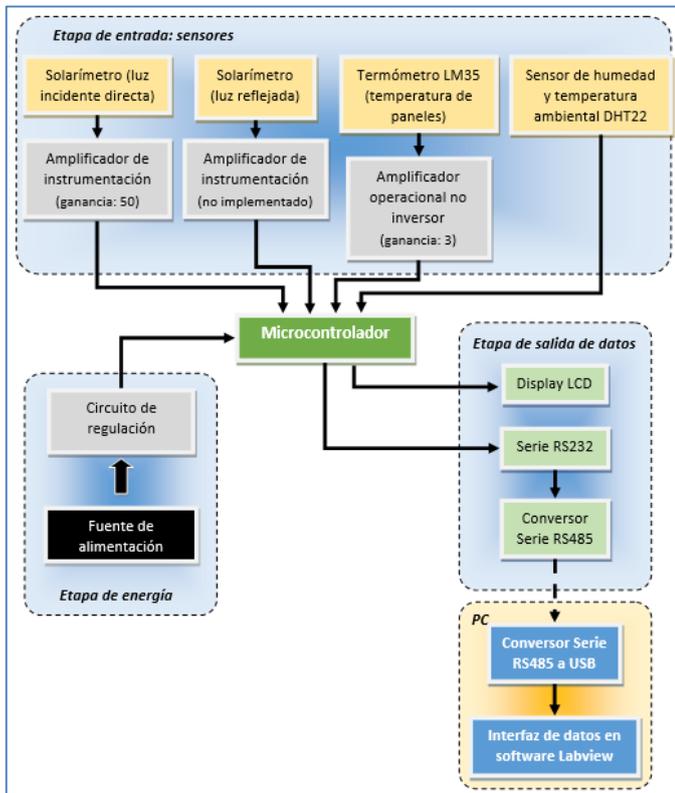


Fig. 4. Diagrama en bloques del sistema.

Sensores piranométricos fotovoltaicos

Para la medición de radiación solar se utilizaron celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino que se observan en la Fig. 5. Fueron diseñadas y fabricadas por el Grupo Energía Solar de la CNEA [11].

La respuesta de cualquier sensor fotovoltaico no es lineal y depende de la longitud de onda de la radiación, lo cual limita su uso a la determinación de valores diarios de la irradiación global una vez que se ha comparado estadísticamente su comportamiento con el de un piranómetro termoeléctrico y determinado su constante media. Sin embargo, debido a su bajo costo y su respuesta casi instantánea resultan útiles como solarímetros secundarios.

Dentro de sus características técnicas, se puede mencionar que estos sensores tienen un área activa de 0,13 cm².

Acondicionamiento de señales

Debido a que los sensores a utilizar como solarímetros presentan una salida máxima de algunos milivolts de amplitud, resulta necesario un acondicionamiento de la señal que luego será procesada por el microcontrolador. Considerando que el módulo conversor analógico-digital del microcontrolador elegido trabaja con un mínimo de 0V y un máximo de 5V, y tomando como referencia 50 mV como tensión máxima que entregarían los sensores, se calcula un amplificador de instrumentación con una ganancia de cincuenta veces y luego como segunda etapa, se incluye un amplificador no inversor con ganancia igual a dos en cascada. De esta manera, con 50 mV en la entrada del primer amplificador, se tiene una salida de 5V, maximizando la resolución del conversor analógico-digital. Por falta de disponibilidad de un circuito integrado amplificador de instrumentación, se utilizó un circuito que consta de un circuito integrado LM324 [12] con la configuración como se observa en la Fig. 6. Eligiendo arbitrariamente el valor de algunas de las resistencias del amplificador de instrumentación, se ajustaron las restantes para obtener la ganancia deseada, es decir:

$$\Delta V_{instrumentación} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_4}{R_3} \times \left(1 + 2 \times \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\Delta V_{instrumentación} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \times \left(1 + 2 \times \frac{10 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega}\right) = 50 \text{ veces}$$

Para comprobar su correcto funcionamiento, se realizó previamente una simulación por computadora, con el valor de tensión de entrada de 50 mV (Vin), y se observó a la salida los 2,5V esperados. Luego de este circuito se conecta una segunda etapa de amplificación, en configuración no inversor, con ganancia igual a 2, dando una ganancia total igual a 100. Tal como se espera, no alcanza los 5V (tensión de alimentación) debido a la caída interna por su construcción física, este problema puede solucionarse alimentando estos circuitos con una mayor tensión, no obstante, no resulta de interés, debido al límite máximo de tensión de entrada tomado (50 mV), no resulta alcanzado en la práctica.

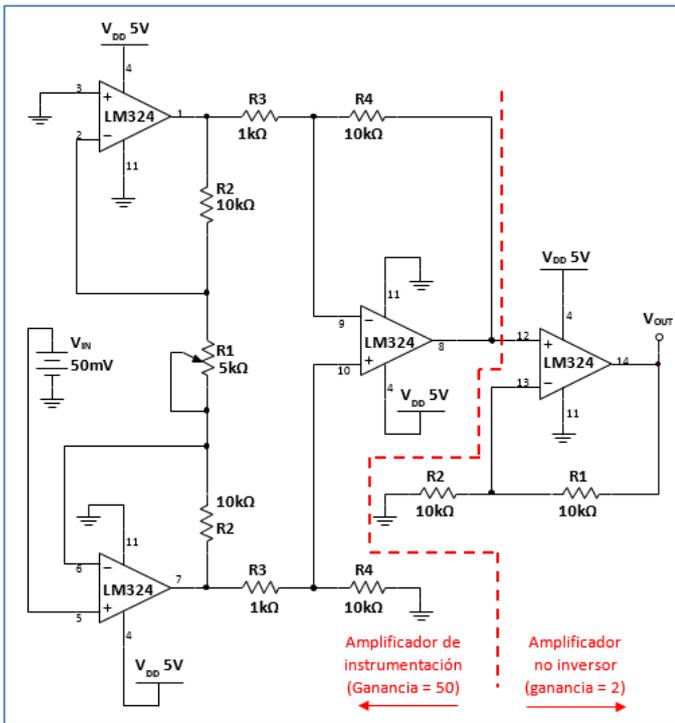


Fig. 6. Esquema del circuito amplificador de instrumentación

En la Fig. 8, se muestra el prototipo completo, integrando cada uno de los circuitos analizados, según el diagrama en bloques de la Fig. 4, cabe aclarar que el microcontrolador se ubica debajo del Display LCD y los sensores se encuentran mediante las salidas cableadas.

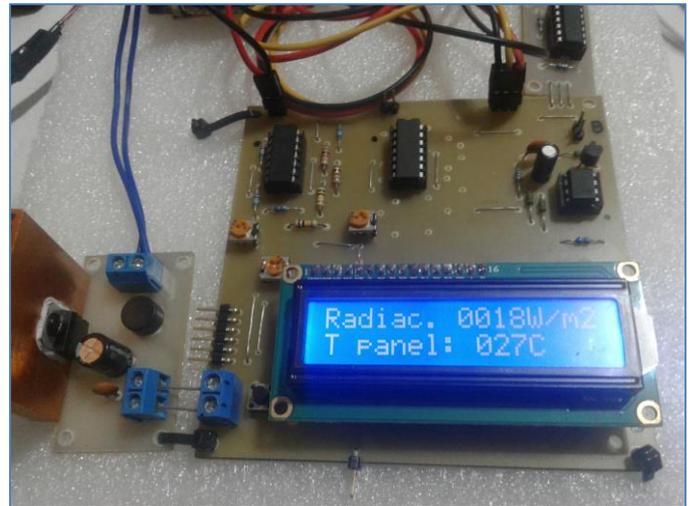


Fig. 8. Prototipo completo (sin gabinete).

Comunicación serie RS485

Debido a que el microcontrolador utilizado solo posee comunicación serie USART y existe una distancia considerable entre la toma de datos y la oficina con la PC, se recurre a un circuito (mostrado en la Fig. 7) capaz de adaptar la comunicación serie del microcontrolador a una comunicación serie RS485 que puede funcionar a distancias mayores. Por otra parte, en la PC se conecta un adaptador USB a serie RS485.

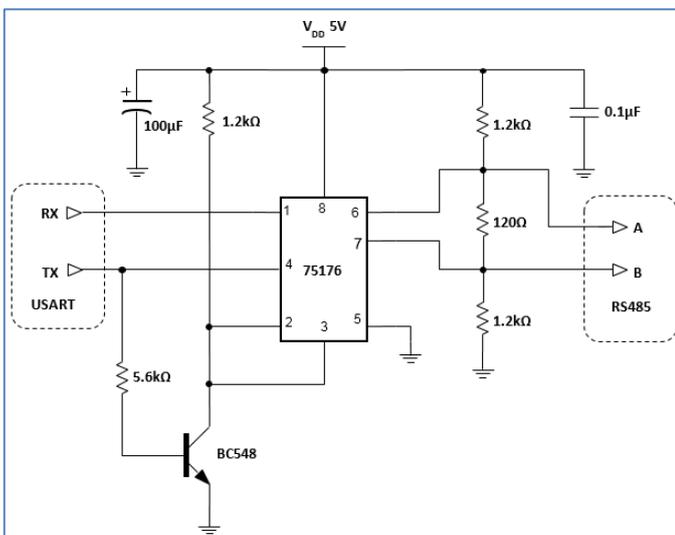


Fig. 7. Esquema de circuito de adaptación serie USART a RS485

Transmisión de datos serie e interfaz en PC

La trama de datos enviada se compone por cuatro caracteres que determinan la energía solar irradiada directamente, cuatro caracteres correspondientes a la energía solar difusa, dos caracteres de temperatura de los paneles, cuatro caracteres para la temperatura ambiental (con el punto y un dígito decimal), cuatro caracteres para la humedad ambiental (con el mismo formato que la temperatura ambiental) y un carácter de finalización de trama.

Estos datos se refrescan cada tres minutos, para tener una información acorde al resto del sistema implementado con anterioridad.

Si bien no está terminado aún el Instrumento Virtual para usar en Labview, ya se ha comprobado la correcta transmisión de datos utilizando un terminal serie virtual en la PC. Como cualquier programa realizado en Labview existen dos partes bien diferenciadas:

- Panel frontal o interfaz gráfica con el usuario: por el momento solo cuenta con indicadores numéricos de los valores medidos por el prototipo desarrollado, pero podría incluir gráficos o indicadores de otro tipo según se considere útil. Esta interfaz también permite el ingreso de datos, para ser procesados como cálculos o bien como órdenes de salida y obtener una comunicación bidireccional con el prototipo.
- Diagrama de bloques: es quien realiza las funciones del programa implementado, procesa las entradas y salidas creadas en el panel frontal. El programa implementado consiste en una secuencia de tres etapas; comienza

inicializando el puerto serie especificado mediante la función VISA Configure Serial Port (es necesario poseer los drivers de adquisición de datos de Labview para que el programa funcione). En esta primer etapa se configura la velocidad de transmisión, la cantidad de bits a transmitir y la paridad o no. En la segunda etapa se procede a la lectura de la trama recibida (mediante el bloque VISA Read) y se cuentan los bits recibidos, se invierte el string para analizar el bit de confirmación de trama y si es correcto se vuelve a invertir, se realizan truncamientos para la decodificación de cada magnitud y se asocian a los indicadores correspondientes. La tercera etapa simplemente cierra la comunicación serie con el dispositivo y queda a la espera de una nueva trama de datos.

III. MEDICIONES Y RESULTADOS

Dado que se pretende desarrollar un prototipo capaz de medir, es necesario demostrar la veracidad de la información proporcionada y de la clase del instrumento.

Analizando cada sensor en particular, se tiene:

- Celdas CNEA fotovoltaicas (utilizadas como solarímetros): se cuenta con sus respectivos certificados de calibración. Los sensores CNEA N° de serie 0315,5 y CNEA N° de serie 0416-2 fueron calibrados en el laboratorio del GERSolar en la localidad de Luján contra el sensor Kipp&Zonen CMP11 N° de serie 90953, de constante $8,48 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, tomado como patrón de referencia. Los sensores fueron conectados a registradores automáticos modelo CR1000 n.º de serie 60304 y 72629, respectivamente, de Campbell Scientific; el primero de ellos, durante 13 días de abril de 2015 y el segundo, entre el 15 de diciembre y el 26 de diciembre de 2016. La constante de calibración fue obtenida mediante la comparación de las integrales horarias. Las constantes de calibración tienen como valor $11,2 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ y $10,8 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ respectivamente.
- Acondicionamiento de señal con amplificadores operacionales de instrumentación: posee ciertas alinealidades en su respuesta en la parte inferior de la escala y cerca del límite máximo. El primero de los inconvenientes se soluciona debido a que la instalación piloto comienza a funcionar cuando los paneles reciben poco más de $300 \text{ W}/\text{m}^2$, lo que se traduce en unos 3 mV que proporcionaría el sensor, quedando la zona alineal debajo de este umbral, por lo que se ignorarían dichos datos. No ocurre problema alguno en el límite superior de amplificación debido a que se consideró un alcance de

medición superior (aproximadamente el doble) que el que puede ser proporcionado por el sensor.

- Sensor de temperatura en los paneles LM35: ya que no se requiere una exactitud mayor al grado Celsius, se comprobó su correcto funcionamiento utilizando una termocupla Tipo K. Midiendo diversos objetos con ambos sensores se obtuvo la curva mostrada en la Fig. 9.

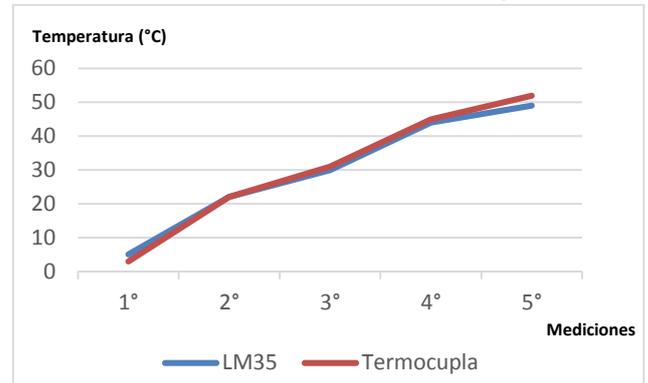


Fig. 9. Curva de contrastación sensor LM35

- Sensor de humedad y temperatura ambiental DHT22: este sensor ya fue utilizado y contrastado en un proyecto anterior [13], recuperando la información de las contrastaciones obtenidas en aquel entonces:
Instrumento patrón de temperatura: *Termómetro Ambiental Checktemp 1. Marca: Hanna Instruments*. Dado que ambos están especialmente diseñados como termómetros ambientales el rango aproximado de medición es de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

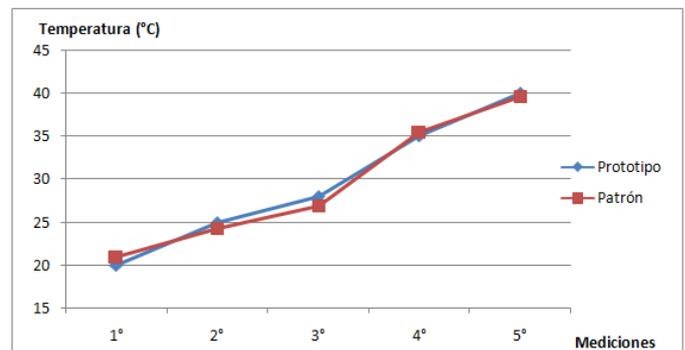


Fig. 10. Curva de contrastación de temperatura sensor DHT22.

Instrumento patrón de humedad: *Higrómetro Analógico de control de humedad en violines. Marca: Stradella MV1414A*.

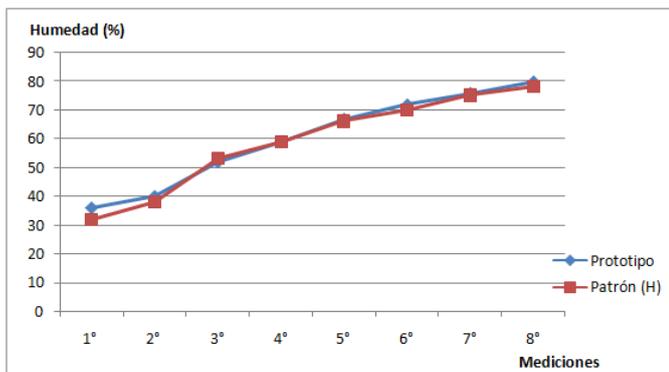


Fig. 11. Curva de contrastación de humedad sensor DHT22.

Cabe mencionar que el montaje del sensor de radiación difusa se encuentra aún en fase de implementación, debido a ciertas condiciones de montaje, tal como ancho de la banda de sombra, inclinación, material, etc. Es decir, aunque se cuente con el *hardware* para el relevamiento de datos, dicha información se ignora por el momento.

IV. CONCLUSIONES

Analizando el prototipo planteado, se compone por un solarímetro de luz incidente, un solarímetro de luz difusa, un medidor de temperatura por contacto y un medidor de temperatura y humedad ambiental, monitoreo de datos en la instalación mediante una pantalla y un monitoreo desde una PC. En instalaciones de paneles solares fotovoltaicos, se concluye favorablemente su implementación debido a los resultados obtenidos, es decir, bajo nivel de error en la medición de cada una de las magnitudes, presenta una construcción sencilla y de bajo costo, disponibilidad de sensores calibrados dentro del país y robustez en instalaciones a la intemperie.

Se proponen tres pasos adicionales: 1) evaluar el tipo de montaje del sensor para radiación difusa y su influencia en el resultado; 2) incluir la medición de corriente continua proporcionada por los paneles mediante un sensor de corriente de efecto Hall; y 3) migrar la visualización de los datos, tanto proporcionados por el inversor como obtenidos de este prototipo, a un ordenador de placa reducida (en inglés: Single Board Computer), a fin de reducir el consumo de energía del monitoreo en comparación con el sistema actual con PC de escritorio.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes; y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, el Departamento de Ingeniería Electrónica y el

Departamento de Ingeniería Electromecánica de la UTN Facultad Regional San Francisco.

VI. BIBLIOGRAFÍA Y SITIOS WEB

- [1] 22.ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Organización de las Naciones Unidas, ONU)
- [2] Ley argentina nro. 27191: modificaciones a la Ley 26190, "Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica". Disponible en <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>.
- [3] <http://www.iresud.com.ar/>
- [4] Fondo Argentino Sectorial, Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, Argentina
- [5] La Voz de San Justo, "La UTN San Francisco ya genera energía solar", San Francisco (Argentina), 11 de agosto de 2015.
- [6] Energía Estratégica, "Inauguran instalación piloto de energía solar en la UTN de San Francisco", Rosario (Argentina), 10 de agosto de 2015. <http://www.energiaestrategica.com/inauguran-instalacion-piloto-de-energia-solar-en-la-utn-de-san-francisco/>
- [7] AEG Power Solutions GmbH, "Protect PV 2000 & 2800 On-Grid Solar Inverter. Operating Instructions", Warstein-Belecke (Alemania), 2012
- [8] AEG Power Solutions GmbH, "Protect PV MONITOR Version 2.1.0.3 Help", Warstein-Belecke (Alemania), 2009.
- [9] Gerardo Szwarz, Nicolás Rocchia, Diego Ferreyra, A. Carina Sarmiento, "Caracterización de parámetros de funcionamiento de una instalación solar fotovoltaica en función del tiempo", en "7ª Jornadas de Ciencia y Tecnología CyTAL 2016: Libro de Actas", pp. 157-162, edUTecNe, ISBN 978-987-1896-61-5, Buenos Aires, 2016.
- [10] Agustín Castejón Oliva, Germán Santamaria Herranz. "Instalaciones solares fotovoltaicas", ISBN 8497716558, España, 2010.
- [11] Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. En Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica 2008, organizado por la Asociación Argentina de Luminotecnia, Rosario, Santa Fe, Tomo I pp. III-38 a III-45.
- [12] Apunte de cátedra Electrónica Aplicada II. Ingeniería Electrónica, UTN Facultad Regional San Francisco, 2012.
- [13] Estación Integral Evaluadora de Factores Ambientales. Trabajo presentado en el V Congreso de Microelectrónica Aplicada – uEA 2014, desarrollado en el Instituto Universitario Aeronáutico.

Nota: última visita a cada sitio web el día 22/09/2017