

MONITOREO PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

Mariela. E. Videla¹, Ismael H. Eyras¹, Julio C. Durán^{1,2}

¹Departamento Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes - Comisión Nacional de Energía Atómica. (CNEA) - Av. Gral Paz 1499 (1650) San Martín - Pcia. de Buenos Aires, Argentina. e-mail: mvidela@tandar.cnea.gov.ar

²Escuela de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) - Tornavías Martín de Irigoyen No.3100 - Campus Miguelete - 1650 Villa Lynch - Buenos Aires. Email: duran@tandar.cnea.gov.

Recibido 20/08/18, aceptado 25/09/18

RESUMEN: En este trabajo se presenta la red de monitoreo para los sistemas fotovoltaicos distribuidos conectados a la red de baja tensión que fueron instalados en el marco del Proyecto IRESUD. Se muestra el análisis que pone de manifiesto el interés en tener los registros de generación de estos sistemas fotovoltaicos ya que cubren la totalidad de las áreas climáticas de la Argentina. Se describe la arquitectura del sistema de monitoreo distribuido, su funcionamiento y su objetivo de compartir desarrollos y administrar los servicios que surgen de la utilización de este tipo de sistemas de generación. También se presenta la organización *coworking* que se establece entre los miembros de la comunidad IRESUD y se exponen los resultados actuales del desarrollo en donde se incluye el monitoreo automático de las estaciones y algunos ejemplos de análisis con los registros que ya se encuentran disponibles en el servidor de monitoreo.

Palabras claves: monitoreo, sistemas fotovoltaicos, generación distribuida, *coworking*

INTRODUCCIÓN

En el año 2012, se formó el consorcio público-privado IRESUD entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Universidad de San Martín (UNSAM) y 5 empresas privadas con el objeto de promover el uso de la energía solar mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión. Este proyecto dejó como resultado un conjunto de aproximadamente 50 sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión distribuidos a lo largo de todo el país (Eyras I. H. et al 2016). Las instalaciones forman un grupo de generadores fotovoltaicos que actualmente en total cuenta con una potencia pico total de aproximadamente 170 kWp. Además, se formó con cada uno de los actores que participaron en su construcción una comunidad que se mantiene activa y sigue creciendo a medida que nuevos miembros ingresan para utilizarla como plataforma de conocimiento y experiencia para instalar nuevos dispositivos conectados a la red de distribución eléctrica. Este grupo está integrado por organismos de ciencia y tecnología, universidades, empresas relacionadas con la generación fotovoltaica y particulares.

La experiencia adquirida en la realización del proyecto IRESUD demostró que la sinergia de estos grupos permite establecer lazos y puentes de transferencia de conocimiento, tecnología, técnicas y estrategias. Esto facilita el acercamiento con la sociedad y permite que estos organismos se involucren en desarrollos tecnológicos relacionados con la generación fotovoltaica que surgen a lo largo y ancho de todo el país.

Con el objetivo de aprovechar la red y el nacimiento de esta nueva comunidad se comenzó un nuevo proyecto de digitalización y administración de los registros de los sistemas fotovoltaicos así como de todas las variables intervinientes en la generación. Es de especial interés para el Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA evaluar la producción de energía fotovoltaica utilizando la infraestructura de IRESUD. Uno de los principales motivos surge debido a su extensión geográfica.

El Proyecto IRESUD cuenta con sistemas fotovoltaicos en casi todas las zonas climáticas del país. Según la clasificación de Köppen- Geiger se puede observar (Figura 1) que existe al menos un sistema fotovoltaico (SF) generando energía en cada zona (Tabla 2), inclusive IRESUD tiene un SF ubicado en la base Marambio, con un clima polar y tal vez en condiciones de funcionamiento no muy frecuentes de encontrar (García J. A. et al 2017).

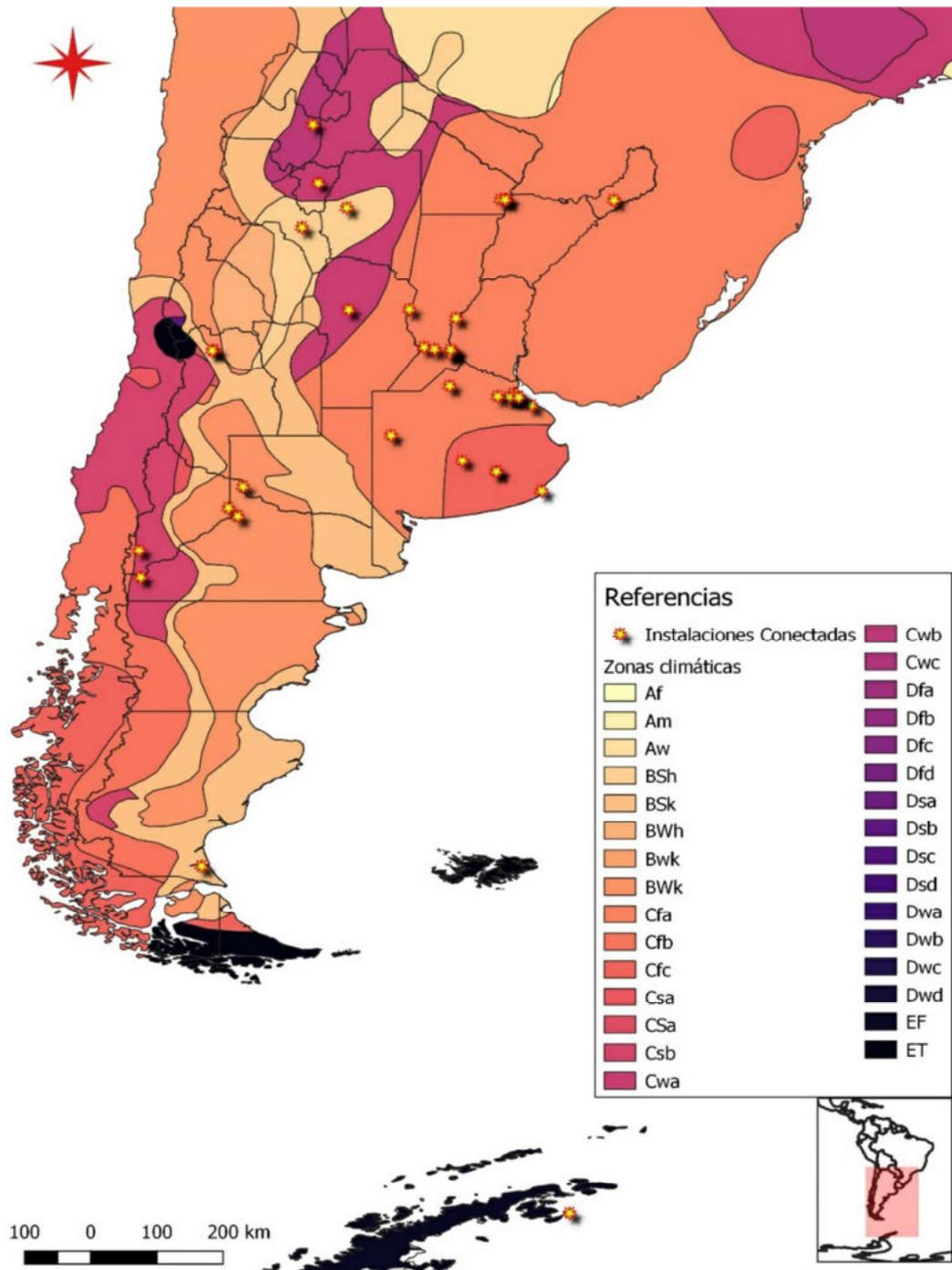


Figura 1 – Los sistemas fotovoltaicos de IRESUD se encuentran marcados con estrellas amarillas. Aunque la mayor densidad de instalaciones se ubica en la zona del Gran Buenos Aires se observan estrellas en todas las zonas climáticas.

Clima Principal	Precipitación	Temperatura
A: ecuatorial	W: desierto	h: árido caliente
B: árido	S: estepa	k: árido frío
C: temperatura templada	f: totalmente húmedo	a: verano caliente
D: nieve	s: verano seco	b: verano cálido
E: polar	w: invierno seco	c: verano fresco
F: escarcha polar	m: monzónico	d: extremadamente continental
T: tundra polar		

Tabla 1 – Definiciones de cada terna para la clasificación Köppen- Geiger. En Argentina existe al menos una instalación perteneciente a IRESUD en las zonas climáticas delimitadas para el país.

Este nuevo proyecto de digitalización requiere que se cree un sistema de adquisición de datos distribuido. Este sistema estará integrado por sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica que pertenezcan a IRESUD y/o que estén interesados en participar del proyecto. El estado de avance, la administración y las tecnologías necesarias que se están utilizando para el diseño de este sistema se presentan en este trabajo.

INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red de IRESUD no tienen dispositivos de almacenamiento de energía. La idea principal en tal arreglo consiste en inyectar la mayor cantidad de energía a la red de distribución eléctrica. En el caso que la carga o consumo en la instalación no supere la generación, el excedente es aprovechado por la red de distribución. En este punto es que se vuelven cada vez más importantes las redes de distribución inteligentes que en algunos casos son capaces de ofertar el excedente en los puntos donde se lo necesite. El principal componente del sistema fotovoltaico junto con los paneles solares es el inversor. Este dispositivo no se encarga solamente de convertir de manera eficiente la corriente y tensión continua generada por los paneles solares o campo fotovoltaico en alterna, sino que además debe cumplir con todas las normas y reglamentos que le permitan un funcionamiento seguro.

Para poder cumplir con todas estas especificaciones es que los inversores monitorean continuamente el estado de variables eléctricas. Estas variables eléctricas son del propio sistema y de la red de distribución en donde se encuentran conectados. Estas variables son la entrada de los diferentes algoritmos que utilizan los inversores para gestionar la inyección a la red. La mayoría de los inversores que se pueden conseguir en el mercado actualmente poseen interfaces que le permiten transmitir o almacenar algunas de estas variables. Por lo general estas interfaces no vienen en los modelos base. Es decir que tienen que ser adquiridas separadamente o especificar que sean incluidas al momento de la compra.

Los inversores que se adquirieron en el marco del proyecto tienen varias interfaces disponibles y además diversos protocolos de transmisión (Tabla 2).

Marca	Modelo	Potencia	Interfaz	Grado IP de protección [3]
AEG	PV2800	2,8 kWp	RS232/RS485	IP65*
AEG	PV4600	4,6 kWp	RS232/RS485	IP65*
AROS	SIRIO	1,5 kWp	RS232	IP65*
INGETEAM	3 PLAY/1 PLAY	10 KWp	RS485	IP65*

Tabla 2 – Listado de los inversores que se instalaron durante el proyecto IRESUD. Hasta el momento existe un esfuerzo para estandarizar las diferentes interfaces y protocolos pero por el momento cada fabricante desarrolla uno propio.

Para poder tener un registro permanente de los inversores no solo es necesario que estos dispongan de interfaces de transmisión de datos sino que además es necesario una computadora que reciba esa información y la almacene. Los equipos utilizados en IRESUD tienen cada uno su propio software que permite su monitoreo. Este software propietario está diseñado para ser instalado en una computadora de escritorio con sistema operativo Windows.

Los inversores de IRESUD (y la gran mayoría de los inversores) generalmente no se encuentran instalados en ambientes de oficina donde es posible disponer de una computadora de escritorio conectada al inversor. Estos se ubican en zonas cercanas al campo fotovoltaico de manera de evitar las pérdidas de energía que se producen en un cableado de corriente continua. Además los inversores en función de su grado de protección especificado por el estándar CEI 60529 (IEC 60529, 2004) solo pueden ser ubicados en locaciones acondicionadas para tal fin. El primer paso para poder conformar un sistema de monitoreo distribuido es proveer a cada uno de los inversores un dispositivo capaz de recibir los datos de monitoreo, almacenarlos y que además éste sea de bajo costo.

RED DE MONITOREO

Para implementar la red de monitoreo es importante decidir qué variables serán las que conformarán el registro. Como se muestra en la Tabla 1 actualmente coexisten tres marcas de inversores y cada uno de ellos tiene un protocolo propio que le permite transmitir las variables que se detallan en la Tabla 2.

Nombre de variable	Descripción
Vdc	Es la tensión de corriente continua del campo fotovoltaico o del arreglo de paneles que se encuentra conectado al inversor.
Idc	Es la corriente continua que genera el campo fotovoltaico o arreglo de paneles que se encuentra conectado al inversor.
Vin	Es la tensión ac que se aplica sobre la red de distribución para inyectar.
Vac	Es la tensión ac en el punto de inyección.
Iac	Es la corriente ac que el inversor se encuentra inyectando a la red.
Fac	Es la frecuencia de la red de distribución.
Pin	Es la potencia inyectada por el inversor a la red de distribución.
Temp	Es la temperatura de trabajo del inversor
Estado	Es una variable que codifica el estado del inversor, esta puede indicar cuando el inversor está inyectando a la red, cuando no lo está haciendo o cuando ha ocurrido un fallo y el inversor se ha desconectado de la red.
Vector de fallas	Por lo general cuando el inversor detecta una falla o anomalía se desconecta de la red e indica el motivo de la desconexión en este vector. También adjunta información cuantitativa del motivo de la desconexión en caso de ser necesaria

Tabla 2 – Listado de variables que puede transmitir un inversor cuando está en funcionamiento.

Algunos inversores debido a su topología y funcionamiento no transmiten las variables de corriente continua del campo fotovoltaico. Otros al tener más de un seguidor de punto máximo de potencia (MPPT) duplican o triplican la información disponible (algo similar ocurre cuando se trata de inversores trifásicos).

En conjunto con estas variables a veces es útil conocer el valor de otros parámetros que no pertenecen al inversor. Un ejemplo de esto serían las temperaturas de los paneles solares cuando se necesita diagnosticar o conocer las curvas de corriente y tensión (curvas I-V).

Las variables meteorológicas también son importantes al momento de analizar el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos. La más importante es la radiación solar incidente en el plano de los paneles solares, estas en conjunto con la temperatura permiten comprobar el desempeño de un sistema fotovoltaico ya sea con datos experimentales o comparando su generación con simulaciones numéricas.

Una meta de la red de monitoreo de IRESUD consiste en poder registrar la mayor cantidad de variables para todos los sistemas fotovoltaicos concentrándonos en las variables del inversor y las variables meteorológicas aquí nombradas.

COMUNIDAD IRESUD

Como se mencionó en la introducción de este artículo, la red ya cuenta con una comunidad que se formó y creció en conjunto con la infraestructura de IRESUD. Es útil entonces aprovechar esta sinergia para montar también la infraestructura de la red de monitoreo. La metodología que se utiliza es la de trabajo cooperativo o *coworking* en donde la oficina virtual de este emprendimiento es un foro. Definimos la forma de trabajo como *coworking* y no solo *networking* ya que en la comunidad coexisten profesionales, técnicos, científicos y particulares que no necesariamente aportan desde la misma área de conocimiento. Cada desarrollo de un miembro en particular puede ser compartido en la comunidad y utilizado por cada uno de los miembros integrantes. La ventaja reside en que se puede establecer un diálogo directo con el desarrollador para partir de un estado del arte o conocimiento muy superior al que se partiría en caso de emprender una investigación o desarrollo de manera autónoma.

Para esto se ha organizado una oficina virtual con una ventanilla denominada “Monitoreo de Instalaciones”. En esta sección se pueden descargar tanto códigos fuentes como guías de configuración e instalación que le permiten a cada usuario incorporar sus sistemas fotovoltaicos a la red de monitoreo.

ARQUITECTURA DE LA RED DE MONITOREO

La arquitectura de la red está implementada sobre la base de dispositivos denominados *Single Boards Computers* (SBC) o computadoras de una sola placa más específicamente utilizamos las computadoras de la Fundación *Raspberry Pi* ®. Esta selección se realizó basándose en aprovechar los niveles o grados de experiencia de los miembros de IRESUD con dispositivos de aplicación en la Internet de las Cosas (*IoT*).

La plataforma de la red de monitoreo consiste en implementar los protocolos de comunicación de los inversores en estos dispositivos. La ventaja reside en que el inicio en el uso de estas computadoras es muy sencillo ya que fueron diseñadas para niveles de colegios secundarios. Los desarrollos con base en estos dispositivos pueden comenzar desde proyectos muy básicos hasta la complejidad que se desee. Esto último incluyendo la adopción de un diseño de hardware optimizado para la aplicación específica. Otro de los beneficios es que trabajan con sistemas operativos de código abierto y no existen problemas de licencia.

Actualmente existe en el foro de IRESUD un paquete que incluye el protocolo necesario para obtener los registros de los inversores AEG y AROS utilizando la interfaz RS232. Si bien se contaba con interfaz RS485 en estos modelos se pensó en conectar los dispositivos de adquisición junto a los inversores y luego conectarlos a través de internet a un servidor que concentre la información. De esta manera es posible cablear mayores distancias desde la *Raspberry* hasta el *router* más cercano (Figura 2). El paquete se descarga y con la guía de instalación se puede tener funcionando la adquisición en simples pasos. Esta es la configuración de partida. Al disponer de los códigos fuentes es posible incorporar todas las modificaciones que el usuario necesite. Una de las configuraciones posibles es

incorporar un monitor mediante un cable HDMI a la *Raspberry* y visualizar las variables que se desee. El paquete inicial solo grafica la potencia generada.

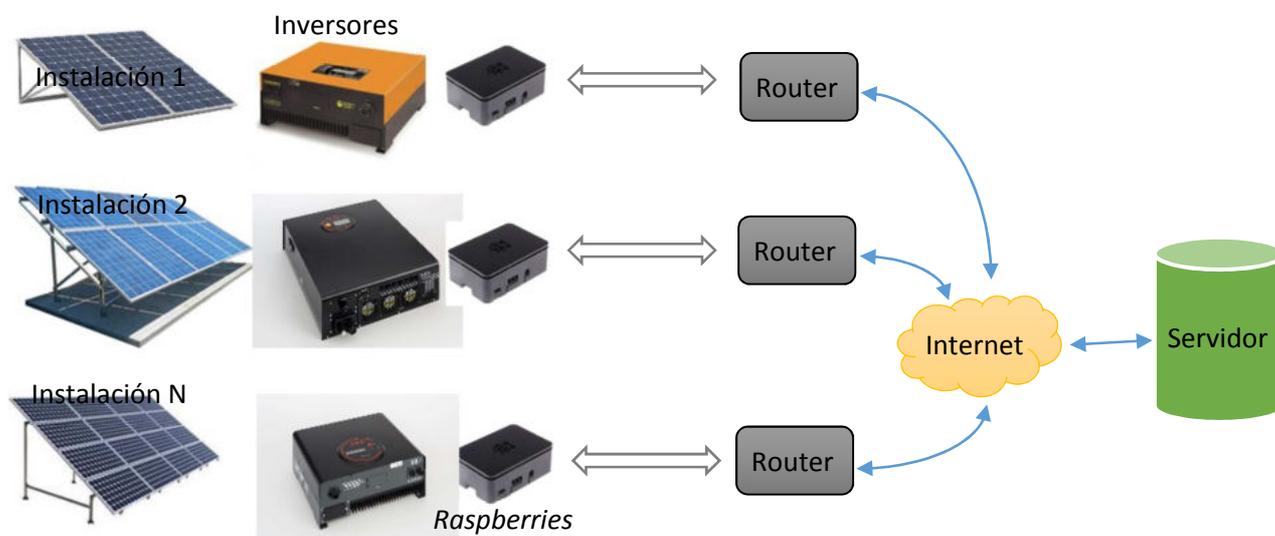


Figura 2 – Arquitectura de la red de monitoreo de IRESUD. Cada sistema fotovoltaico almacena localmente y envía los registros al servidor de monitoreo.

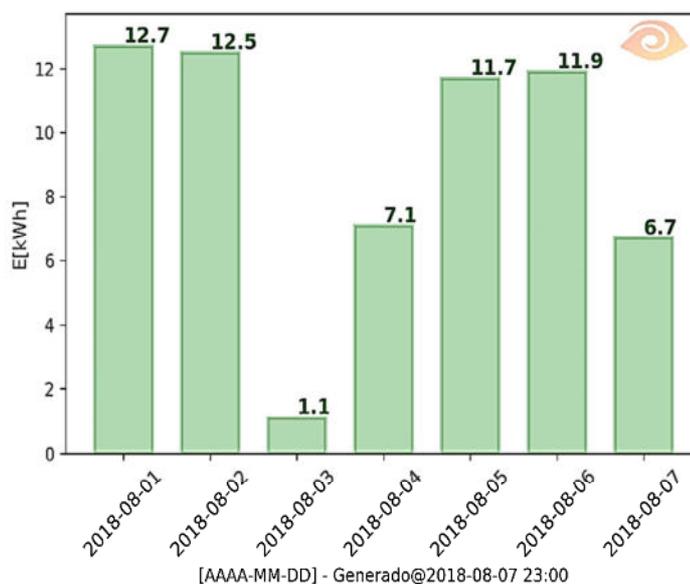
Cada miembro de la comunidad IRESUD al conectar su sistema fotovoltaico a la red de monitoreo se transforma en usuario del servidor. Esto le da acceso a los registros de los demás usuarios que están conectados a la red. En una etapa posterior se podrán visualizar y descargar todos los registros mediante un sitio web diseñado a tal fin. Actualmente hay nueve sistemas fotovoltaicos conectados a la red de monitoreo que envían sus datos al servidor central (Tabla 3).

Ubicación (ciudad)	Inversor(s)	Potencia pico instalada	Tipo de monitoreo	Clima
San Martín, BA (terraza)	AEG	2,4 kWp (variable, pruebas)	<i>RaspberryRaspberry</i>	Cfa
San Martín, BA (pérgola)	AEG	4,945 kWp	AEG ®	Cfa
Rosario, Santa Fe	AROS	2,16 kWp	AROS ®	Cfa
Santiago del Estero, Ciudad	AEG	4,8 kWp	<i>RaspberryRaspberry</i>	BSh
Santa Cruz, Ciudad	AROS	1,88 kWp	<i>Raspberry</i>	BSk
Rojas, BA	AEG	2,88 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Paraná, Entre Ríos	AEG	2,88 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Luján, BA	AROS	1,92 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa
Capital Federal, Palacio de Hacienda	AROS	4,465 kWp	<i>Raspberry</i>	Cfa

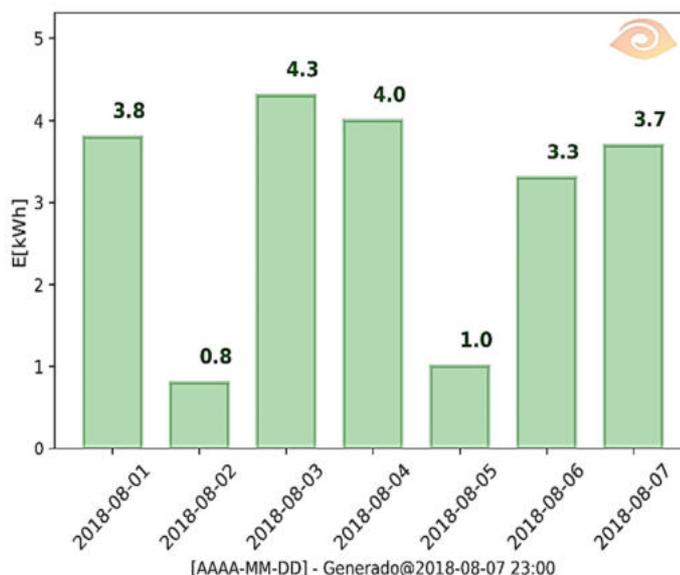
Tabla 3: SF conectados a la red de monitoreo, aquellos que se encuentran conectados a la red pero aún conservan el software propietario de monitoreo poseen un muestreo superior a los 5 minutos debido a restricciones de las redes locales en donde se encuentran funcionando.

REGISTROS EN EL SERVIDOR DE MONITOREO

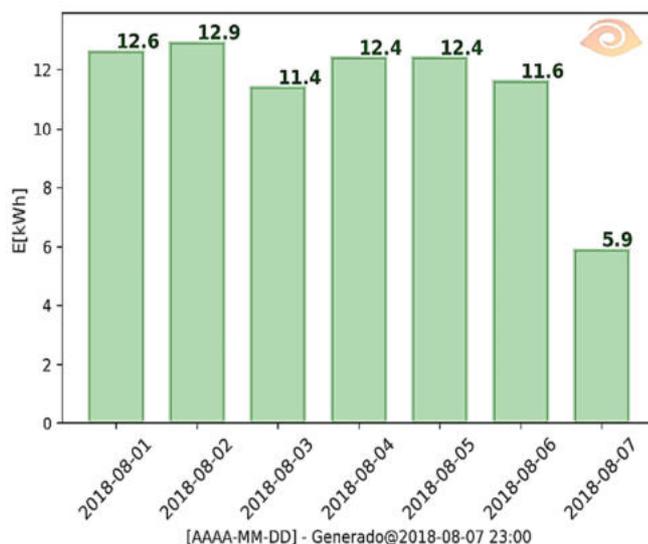
Para que el servidor de monitoreo almacene toda la información disponible en las *Raspberries*, las mismas, están configuradas para que transfieran y actualicen sus registros cada 5 minutos. El servidor en base a estos registros construye algunos gráficos que permiten actualmente hacer un seguimiento mínimo de los sistemas fotovoltaicos conectados. Estos gráficos corresponden a la potencia inyectada a la red y a la energía generada diariamente. En la Figura 3 se observan los registros de la energía generada diaria durante la primera semana de agosto del año 2018 de cuatro SF conectados a la red de monitoreo. En la Figura 3a observamos la energía diaria de un SF ubicado en la zona climática Cfa, en la Figura 3b el SF se ubica en la zona BSk, en la Figura 3c el SF se encuentra instalado en la zona Cfa y finalmente en la Figura 3d el SFV se localiza en la zona BSh. Los inversores ubicados en Santiago del Estero (Figura 3d) tienen una potencia pico de 4,6 kW, mientras que los demás sistemas corresponden a potencias entre 1,5 kW y 2,8 kW.



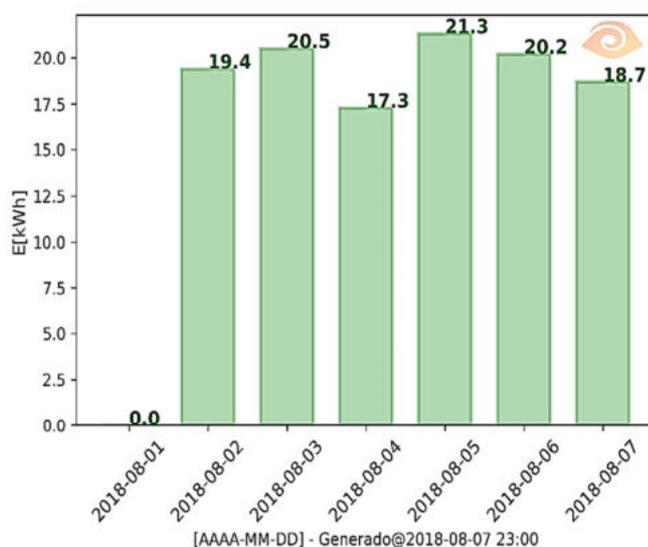
3a: Centro Atómico Constituyentes. CNEA. San Martín. Bs. As (Cfa)



3b: Universidad Tecnológica Nacional. FRSC. Rio Gallegos. Santa Cruz (BSk)



3c: Universidad Tecnológica Nacional. FRP. Paraná. Entre Ríos (Cfa)

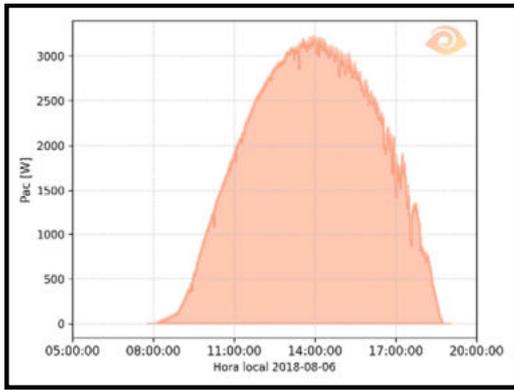


3d: Universidad Nacional de Santiago del Estero. Capital. Santiago del Estero (BSh)

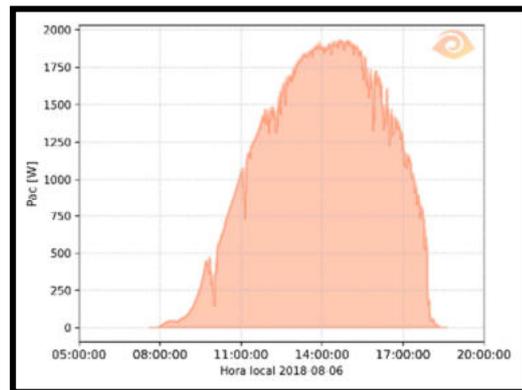
Figura 3: Energía inyectada a la red por SF instalados en diferentes regiones de Argentina. Notar que la escala del eje y no es la misma en todos los gráficos debido a que el servidor auto escala el eje para que las figuras tengan el mismo tamaño.

El símbolo amarillo ubicado en la esquina superior derecha indica que los gráficos fueron generados automáticamente por el servidor.

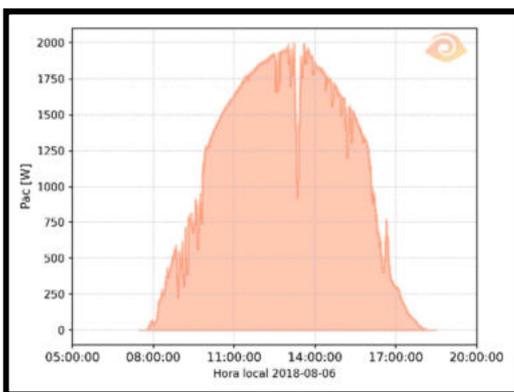
A modo de ejemplo se presentan las curvas de potencia instantánea para un mismo día de agosto (Figura 4) en el mismo momento pero en diferentes locaciones (Figura 5).



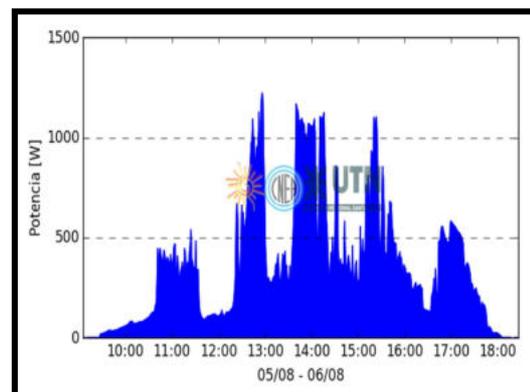
4a: Universidad Nacional de Santiago del Estero



4b: UTN Facultad Regional Paraná



4c: CNEA Terraza Edificio Tandar



4d: UTN facultad Regional Santa Cruz

Figura 4: Potencia generada en diferentes SF de la red de monitoreo. Se observa en color azul la curva del SF de la UTN Regional Santa Cruz que se grafica localmente en la Raspberry y luego es transmitida al servidor. En rojo se presentan las curvas generadas automáticamente por el servidor utilizando los datos transmitidos.

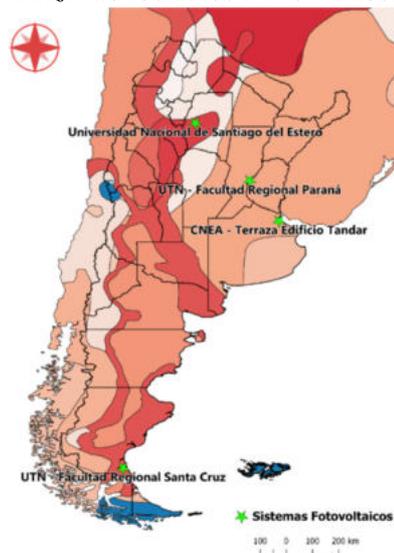


Figura 5: Ubicación de los SF analizados.

Finalmente se muestra un análisis del sistema fotovoltaico ubicado sobre el edificio de la Cooperativa de Luz y Fuerza Eléctrica de Rojas en la Ciudad de Rojas, Buenos Aires. Este análisis se realizó con un conjunto compuesto por las variables que se encuentran disponibles y que permiten diagnosticar un problema durante el día 18/7/2018 (Figura 6). En este ejemplo se graficó la tensión del arreglo de paneles y la temperatura del inversor durante el día en azul y amarillo respectivamente (Figura 6a). Se observa que la tensión en el campo fotovoltaico no presentaba ninguna anomalía. En la Figura 6b se presenta la curva de estado de funcionamiento del inversor, la misma verificaba que aun teniendo tensión en los paneles no se estaba inyectando energía a la red (estado 2). Las curvas de potencia y tensión de la red no se muestran ya que ambas se encontraban en cero. Este SF posee una llave térmica en la salida del inversor que se conecta a la red eléctrica. En esta ocasión la llave se encontraba en posición de apagado. Es por esta razón que el inversor al no detectar tensión de red pero aun teniendo tensión en el campo fotovoltaico no inyectaba a la red cumpliendo con las normas establecidas para el funcionamiento de inversores.

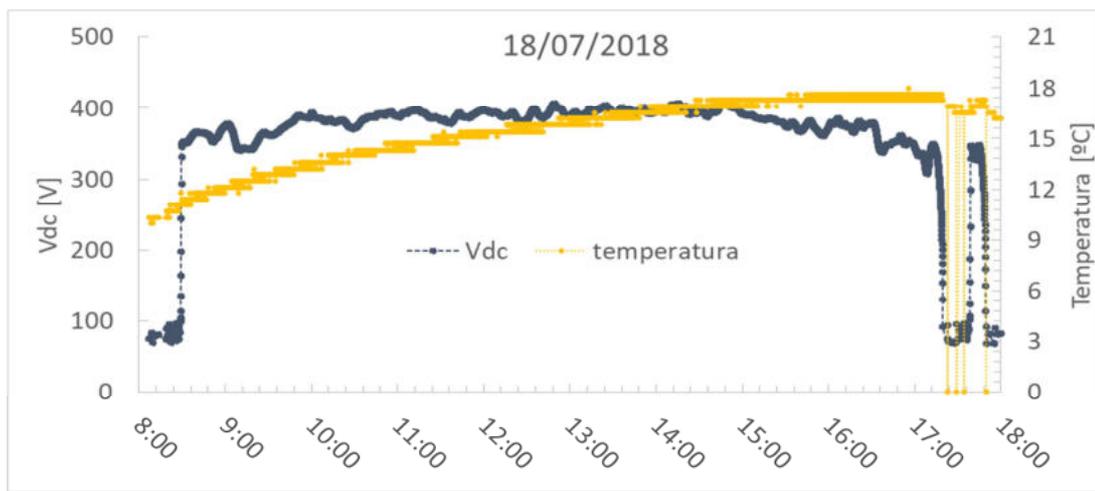


Figura 6: Tensión del conjunto de paneles y temperatura del inversor del sistema fotovoltaico de la ciudad de Rojas.

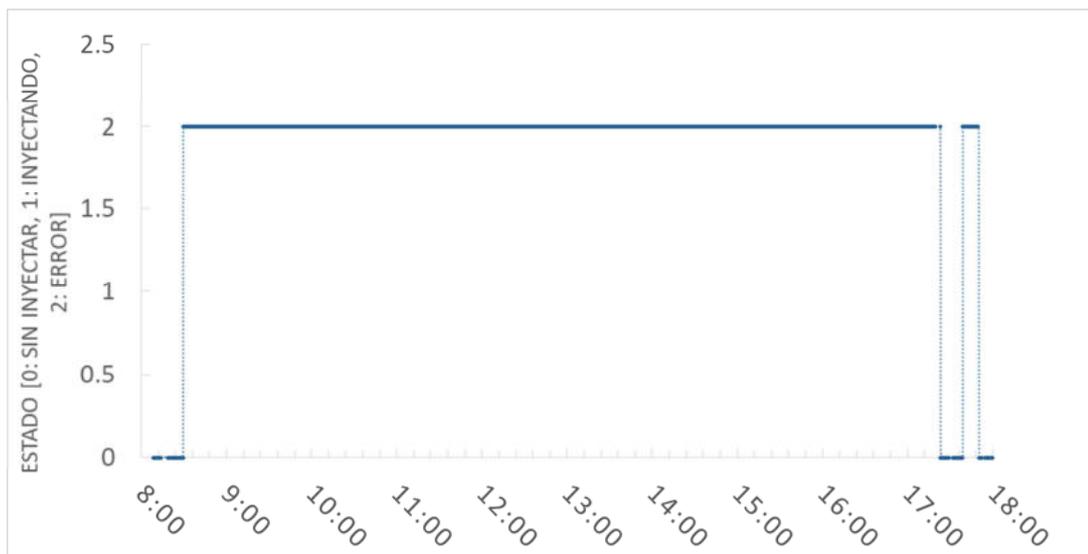


Figura 6 – Curva de la variable de estado del sistema fotovoltaico de la ciudad de Rojas. Permanece en estado 2 (error) durante todo el día hasta que el nivel de tensión del arreglo de paneles disminuye a valores por debajo de los 100 V en ese momento la variable de estado se coloca en 0 indicando que el sistema está fuera de línea.

También se puede observar en las Figuras 6 y 5 que cuando la tensión de los paneles disminuía por debajo del rango de funcionamiento el inversor se apagaba hasta que este valor alcanzaba nuevamente

el valor mínimo de funcionamiento. Como esto ocurrió durante el atardecer (bajos valores de radiación) el inversor ingresó en una fase de verificación de la tensión de red y nivel de tensión del campo fotovoltaico. Esto se observa en la alternancia entre los estados 2 y 0 al final de la curva en la Figura 6.

CONCLUSIONES

En este artículo se describe el diseño del sistema de monitoreo de SF conectados a la red de baja tensión. La experiencia adquirida en la realización del proyecto IRESUD demostró que la comunidad organiza entre estos grupos una sinergia que permite establecer lazos y puentes de transferencia de conocimiento, tecnología, técnicas y estrategias. Esto facilita no solo el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo sino que también produce un acercamiento entre la sociedad y cada uno de los actores del sistema científico tecnológico. El estado actual del sistema de monitoreo está permitiendo registrar cada vez más instalaciones fotovoltaicas pertenecientes a IRESUD inclusive hay interés de agregar sistemas que no integraron el proyecto inicial. En caso de fallas se transmiten las advertencias a cada uno de los responsables para que se tomen acciones ya sea de mantenimiento como de reparaciones. El servidor con su funcionamiento actual permite compartir la información de los registros. Esta actividad será más simple de realizar cuando se genere el sitio web destinado a tal fin. Se espera que se integren más instalaciones. Al momento de escritura de este artículo se están por incorporar a la red los sistemas fotovoltaicos instalados en la Universidad Nacional de La Plata y la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los miembros de la red IRESUD y en especial a Carlos Juarez, Romina Rodriguez, Pablo Bahamonde, Gabriel Gareis, Fabián Arrostito y Diego Ferreyra por su activa colaboración en el foro. También agradecemos a María José Saletta por su ayuda en la confección de los mapas GIS de la red y a Gabriela Durán quien coordina las cuestiones administrativas, contables y de difusión del proyecto IRESUD.