

Informe Técnico de Avance

# ESTADO DE LA RED SOLARIMÉTRICA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

Grupo de Energías No-Convencionales (GENOC)

Facultad de Ingeniería Química (UNL)

Instituto de Física del Litoral (CONICET-UNL)



Santa Fe, 10 de Junio 2016

# INFORME TÉCNICO DE ESTADO DE AVANCE DE LA RED SOLARIMÉTRICA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

## INTRODUCCIÓN

Las fuentes convencionales de energía, que aún hoy siguen abasteciendo la mayor parte del consumo energético mundial, son las principales causantes de los cambios climáticos debidos a la emisión de gases que provocan el efecto invernadero. Sin embargo, se está tomando conciencia de la necesidad de cambiar la matriz energética mundial, utilizando las energías renovables que hay disponibles para su aprovechamiento. Al mismo tiempo que en países como Alemania la energía fotovoltaica ya provee alrededor del 7 % del consumo de electricidad, en Argentina es prácticamente nulo el porcentaje de energías renovables usadas. Se puede mencionar en este sentido a la Provincia de Santa Fe como una de las pioneras en comenzar a fomentar el uso de la energía fotovoltaica en instituciones tales como escuelas rurales del norte de la Provincia.

En la actualidad, el Gobierno de la Provincia de Santa Fe tiene interés en sumar las energías renovables a la matriz energética provincial. En este sentido, la Secretaría de Estado de la Energía de la Provincia, a través de la Subsecretaría de Energías Renovables (SSER), busca conocer con mayor precisión qué potencia de radiación solar llega a las distintas zonas del territorio santafesino. Con esos datos se pretende analizar si el recurso solar es aprovechable para generar electricidad, ya sea en forma directa por medio de paneles solares (energía fotovoltaica), o en forma indirecta a través de calentar algún fluido (energía solar térmica). Conocer esos datos posibilitará que cualquier empresa que quiera producir energía solar en Santa Fe sepa anticipadamente con qué recursos cuenta, ya que el tiempo de repago de la inversión dependerá de cuánta energía pueda producir.

El éxito de cualquier proyecto de aprovechamiento de la energía solar depende fuertemente de la disponibilidad de radiación solar en esa ubicación, haciendo que el conocimiento del recurso solar sea un dato crítico para la elección del emplazamiento y el planeamiento de la instalación. Con el fin de medir la radiación solar en su territorio, la Provincia de Santa Fe ha instalado una “Red Solarimétrica”.

Dicha red está emplazada en cinco ubicaciones o sitios de la provincia, específicamente en Estaciones Transformadoras (EETT) de la Empresa Provincial de la Energía (EPE), que a tales fines fueron seleccionadas para cubrir la medición en todo el territorio santafesino. Las localidades elegidas fueron las siguientes:

- 1) Tostado** (Departamento 9 de Julio);
- 2) Reconquista** (Departamento General Obligado);
- 3) Elisa** (Departamento Las Colonias);
- 4) Cañada Rosquín** (Departamento San Martín);
- 5) Firmat** (Departamento General López).

De este modo se cubre una buena porción del territorio, lo que permite evaluar cuál es la densidad de potencia que llega a cada zona. Esta red proveerá a los diseñadores de sistemas de aprovechamiento de la energía solar, arquitectos, ingenieros, analistas de energías renovables y público interesado de amplia información sobre la radiación solar.

Para llevar a cabo las acciones de instalación, puesta en marcha, mantenimiento y operación de la Red Solarimétrica de la Provincia de Santa Fe, se procedió a la firma de un convenio con la Universidad Nacional del Litoral (UNL), a través de una unidad ejecutora formada por un grupo de profesionales pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Química (FIQ, UNL) y al Instituto de Física del Litoral (IFIS-Litoral, UNL-CONICET), que conforman el grupo de Energías no Convencionales (GENOC).

### **OPERACIÓN DE LA RED SOLARIMÉTRICA**

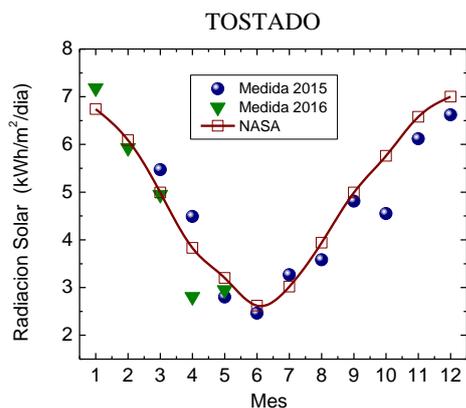
El equipamiento, que trabaja en forma autónoma, acumula los diferentes datos y luego los transmite a un centro de procesamiento ubicado en la ciudad de Santa Fe. Los datos se toman cada tres minutos, y se transmiten una vez por hora. Se cuenta con un sistema de comunicación basado en telefonía celular GPRS que envía la información, además de un panel solar que alimenta la batería del equipo. Los datos son recibidos en una computadora central de donde se capturan para su procesamiento. La Figura 9 muestra el software de interfase a través del cual se accede al control de funcionamiento a distancia.

Diariamente el GENOC controla a distancia, por medio de la red celular GPRS, el funcionamiento del sistema. También se realizan visitas de mantenimiento preventivo a cada estación, para mantener el buen estado de los sensores solarimétricos, demás equipos y paneles fotovoltaicos de alimentación de los sistemas. Durante las visitas e inspecciones se resuelven las falencias y fallas que pudieran surgir y que no hayan sido detectadas a distancia. También se concurre a la instalación donde se detecte que una falla impide la recolección de información.

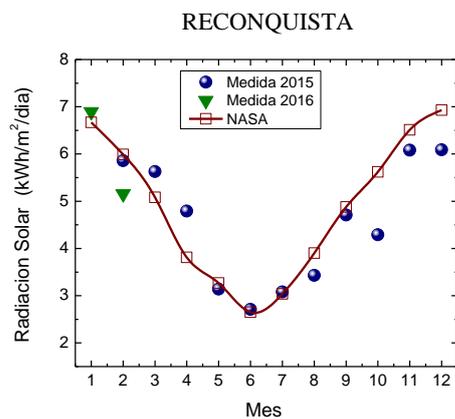
### **ANÁLISIS DE LOS DATOS**

#### **Radiación Global en el plano horizontal**

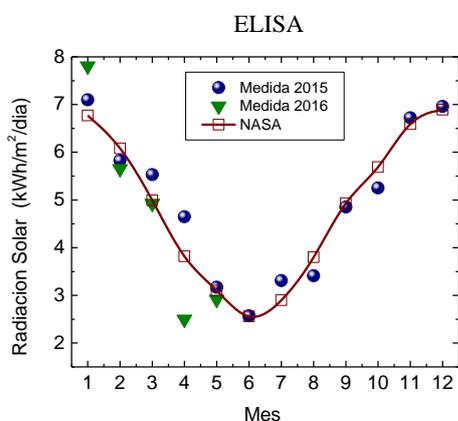
Se presenta una comparación entre lo medido por la Red Solarimétrica y los valores reportados por la NASA (Agencia Espacial Norteamericana). Los valores medidos por la Red Solarimétrica corresponden al año 2015 y los primeros meses del 2016, mientras que los valores de la NASA, obtenidos por mediciones satelitales y no por equipamiento instalado en el lugar de interés, corresponden a un promedio sobre 22 años (Jul. 1983 – Jun. 2005). Esto puede ocasionar discrepancias debido a variaciones climáticas de cada año en particular.



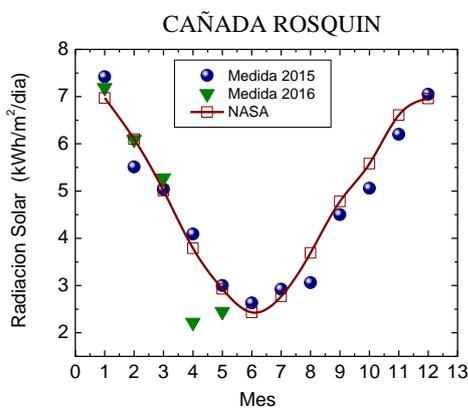
**Figura 1:** Promedio mensual de la radiación global horizontal diaria en 2015 y lo que va del año 2016 en la localidad de Tostado.



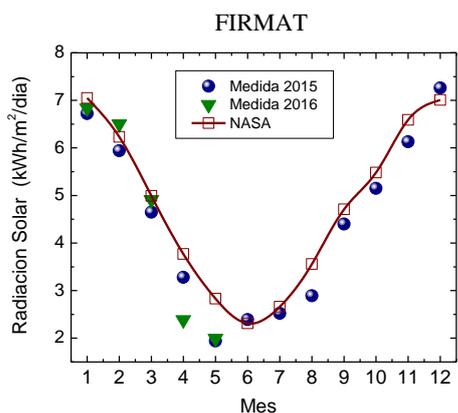
**Figura 2:** Promedio mensual de la radiación global horizontal diaria en 2015 y lo que va del año 2016 en la localidad de Reconquista.



**Figura 3:** Promedio mensual de la radiación global horizontal diaria en 2015 y lo que va del año 2016 en la localidad de Elisa.



**Figura 4:** Promedio mensual de la radiación global horizontal diaria en 2015 y lo que va del año 2016 en la localidad de Cañada Rosquín.



**Figura 5:** Promedio mensual de la radiación global horizontal diaria en 2015 y lo que va del año 2016 en la localidad de Firmat.

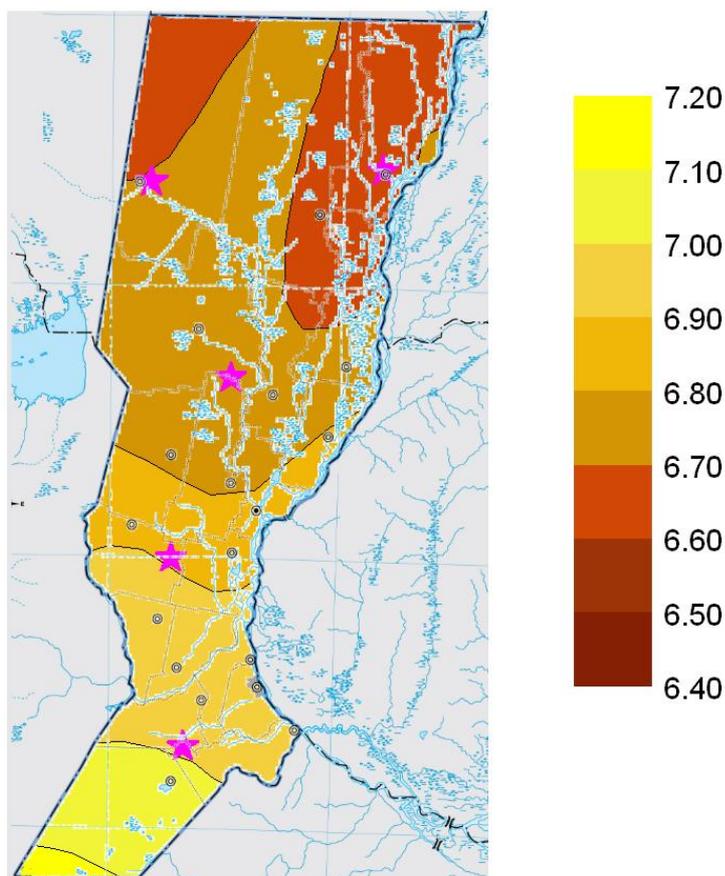
Como se puede apreciar en las Figuras 15-19, tanto los datos medidos por la Red Solarimétrica como los reportados por la NASA presentan la tendencia esperada, con un máximo de insolación en los meses de Diciembre-Enero y un mínimo para el mes de Junio. La diferencia entre ambas series de datos se

encuentra dentro de lo razonable, y puede deberse a la diferencia en el período de recolección de datos, como se mencionó más arriba. En particular, en todas las figuras se aprecia que los valores de radiación solar para el mes de Abril de 2016 se encuentran bastante por debajo del mismo mes de 2015, lo que evidencia la gran cantidad de días de lluvia que se han tenido en Abril de este año.

### MAPAS DE INSOLACION DE LA PROVINCIA DE SANTA FE

A partir de los datos de radiación solar en el plano horizontal, tanto medidos mediante la Red Solarimétrica como provistos por la NASA, se elaboraron los siguientes mapas del recurso solar. Se utilizaron también datos reportados por la NASA porque la diferencia con lo registrado hasta el momento en la Red Solarimétrica está dentro de lo razonable; además los datos de la NASA están dados con intervalos de 1 grado de latitud y longitud, lo que permite dibujar una grilla más fina. Se presentan tres situaciones, correspondientes a los meses de Enero (mes de mayor insolación), Junio (mes de menor insolación) y promedio anual.

### Insolacion media Enero (kWh/m<sup>2</sup>/dia)

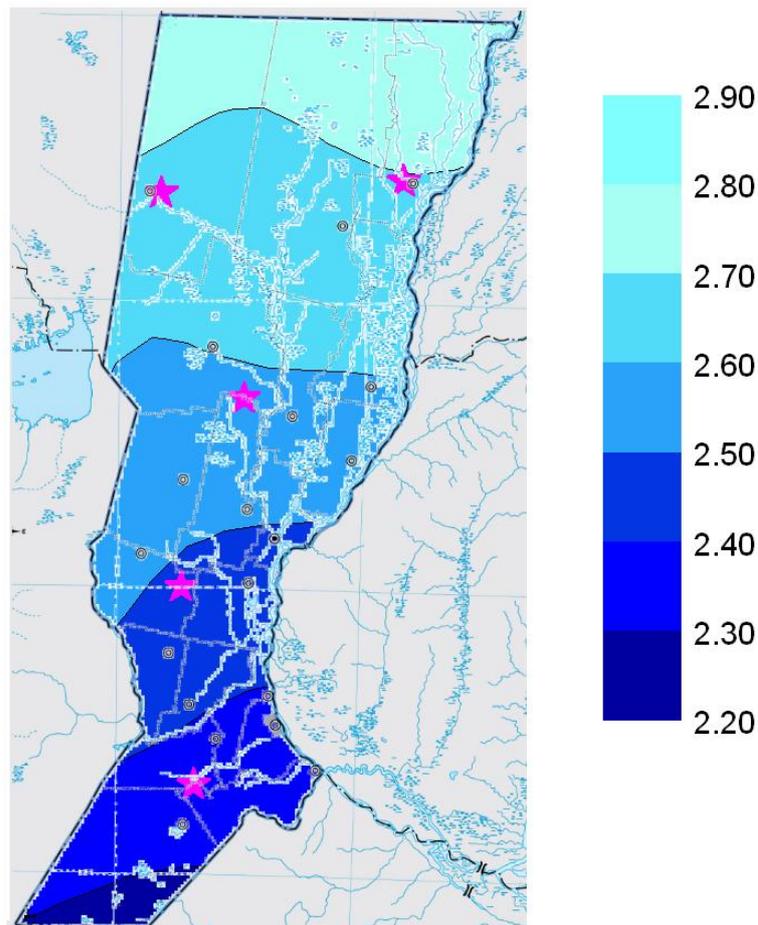


**Figura 6:** Insolación media diaria, medida en kWh/m<sup>2</sup>/día, para el mes de Junio.

En la Figura 6 se observa la insolación media para el mes de Enero. Se puede apreciar que, para la localidad de Reconquista, la insolación media del mes de Enero se encuentra entre 6,60 y 6.70

kWh/m<sup>2</sup>/dia; para Tostado y Elisa está entre 6,70 y 6.80 kWh/m<sup>2</sup>/dia; para Cañada Rosquín está entre 6,80 y 6.90 kWh/m<sup>2</sup>/dia; mientras que para Firmat está entre 6,90 y 7,00 kWh/m<sup>2</sup>/dia. En el extremo sur-oeste de la provincia se observa un máximo de entre 7,10 y 7,20 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

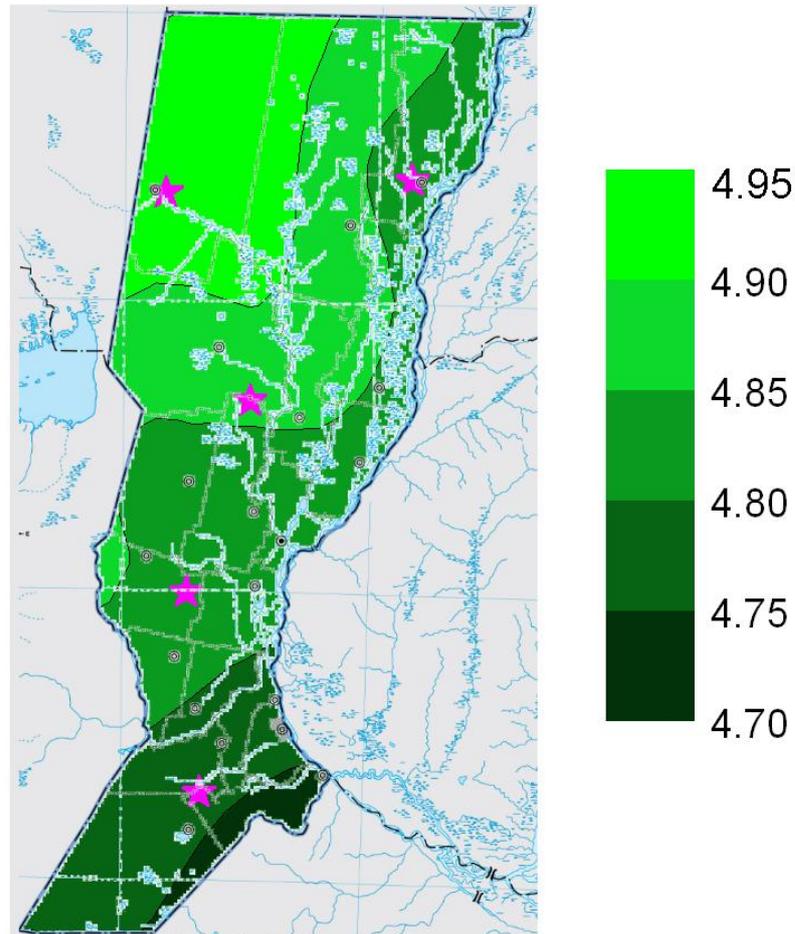
## Insolacion media Junio (kWh/m<sup>2</sup>/dia)



**Figura 7:** Insolación media diaria, medida en kWh/m<sup>2</sup>/dia, para el mes de Junio.

En la Figura7 se observa la situación para el mes de Junio, que es el de menor insolación. En el extremo norte de la Provincia se observa un máximo de entre 2,70 y 2,80 kWh/m<sup>2</sup>/dia; en las localidades de Tostado y Reconquista la insolación media del mes de Junio se encuentra entre 2,60 y 2,70 kWh/m<sup>2</sup>/dia; en la zona de Elisa está entre 2,50 y 2,60 kWh/m<sup>2</sup>/dia; a la altura de Cañada Rosquín está entre 2,40 y 2,50 kWh/m<sup>2</sup>/dia; mientras que para Firmat está entre 2,30 y 2,40 kWh/m<sup>2</sup>/dia. En el extremo sur de la provincia se observa un mínimo de entre 2,20 y 2,30 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

## Insolacion media anual (kWh/m<sup>2</sup>/dia)



**Figura 8:** Promedio anual de la insolación media diaria, medida en kWh/m<sup>2</sup>/día.

Finalmente, en la Figura8 se observa el mapa de la insolación media anual en la Provincia, que es el dato necesario para calcular la energía que puede aportar una central fotovoltaica. Aquí se observa una variación diagonal de la insolación, con un máximo en la zona Noroeste y un mínimo en la zona Sureste. De todas formas, la variación entre los extremos se da entre 4,70 y 4.95 kWh/m<sup>2</sup>/día, lo cual representa una diferencia del 5 % aproximadamente.

## CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA POR UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA EN LAS DISTINTAS ZONAS DE LA PROVINCIA

A partir de los datos presentados anteriormente, brindamos un “cálculo aproximado” de la energía que generaría una central fotovoltaica de 5 MWp(megavatios pico) instalada en cada una de las cinco localidades donde se encuentran las Estaciones de Medición de la Red Solarimétrica, basando los cálculos en el recurso solar medido en la localidad y en las condiciones ambientales.

Para este informe proponemos que las centrales fotovoltaicas sean de iguales características entre sí y estén conectadas a la red de media tensión. La elección de 5 MWpde potencia se debe a que en la Provincia existe un proyecto de instalar plantas fotovoltaicas de estas características.

La energía generada por una central fotovoltaica viene dada por:

$$E_{AC} = H_a(\alpha, \beta) \times P_{GFV} \times PR \quad , \quad (\text{Ec. 1})$$

donde

$H_a(\alpha, \beta)$  es la irradiancia que recibe el plano del panel (función de la inclinación) a lo largo del día,

$P_{GFV}$  es la potencia pico instalada del generador fotovoltaico, el valor por el cual se licita y paga,

$PR$  es un factor de eficiencia que incluye valores fijos y variables.

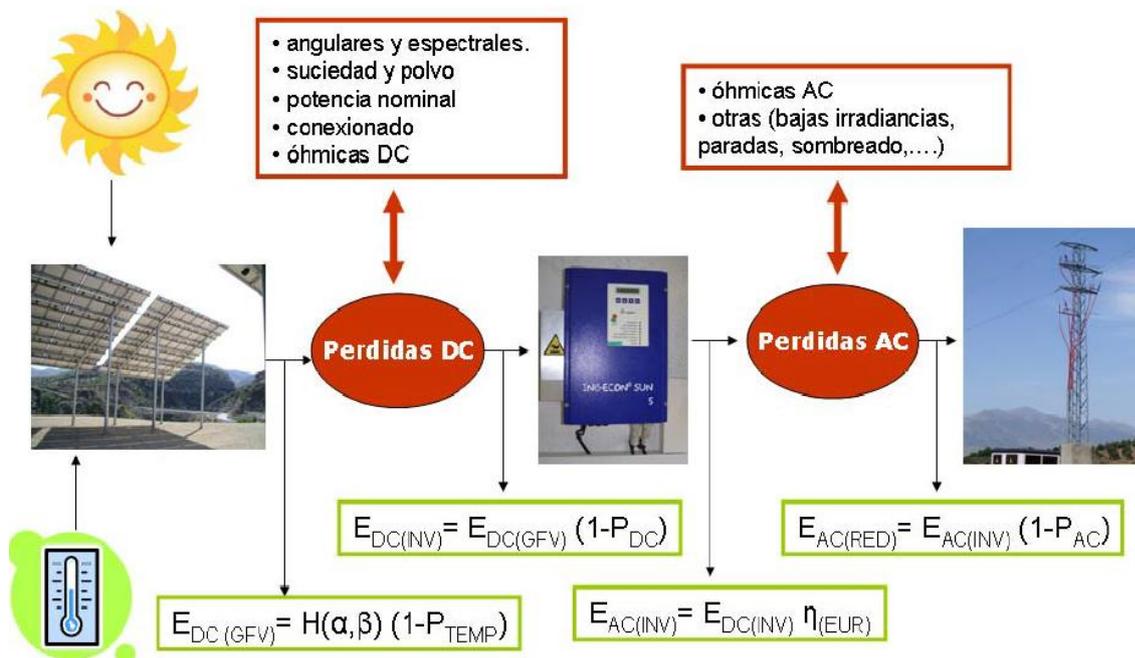
La siguiente tabla resume los valores de radiación global en el plano horizontal.

	TOSTADO		RECONQUISTA		ELISA		CAÑADA ROSQUIN		FIRMAT	
	RED	NASA	RED	NASA	RED	NASA	RED	NASA	RED	NASA
Enero	7.18	6.74	6.9	6.67	7.455	6.77	7.305	6.97	6.78	7.05
Febrero	5.93	6.09	5.51	5.99	5.74	6.08	5.80	6.10	6.22	6.23
Marzo	5.21	4.99	5.63	5.08	5.23	4.99	5.04	5.01	4.78	4.99
Abril	3.65	3.83	4.79	3.81	3.575	3.82	3.155	3.79	2.835	3.77
Mayo	2.875	3.20	3.14	3.27	3.045	3.10	2.725	2.93	1.965	2.83
Junio	2.46	2.62	2.71	2.65	2.57	2.56	2.63	2.43	2.39	2.31
Julio	3.27	3.02	3.08	3.04	3.31	2.90	2.92	2.77	2.52	2.66
Agosto	3.58	3.94	3.43	3.90	3.41	3.80	3.06	3.69	2.89	3.56
Septiembre	4.81	4.99	4.71	4.88	4.85	4.93	4.50	4.78	4.40	4.71
Octubre	4.55	5.76	4.29	5.62	5.25	5.69	5.06	5.58	5.15	5.48
Noviembre	6.12	6.58	6.10	6.51	6.72	6.59	6.2	6.61	6.13	6.59
Diciembre	6.62	7.00	6.09	6.93	6.96	6.89	7.05	6.96	7.26	7.01
<b>Promedio Anual</b>	<b>4.69</b>	<b>4.90</b>	<b>4.70</b>	<b>4.86</b>	<b>4.84</b>	<b>4.84</b>	<b>4.62</b>	<b>4.80</b>	<b>4.44</b>	<b>4.77</b>

**Tabla 2:** Radiación medida en las distintas localidades de la Red Solarimétrica, y comparación con valores obtenidos por la NASA. Los valores están dados en HSP (hora solar pico).

Hay que destacar que los valores de la radiación volcados en la tabla están referidos a la radiación en el plano horizontal, mientras que en la Ec. 1 se necesita la radiación en el plano del panel. En consecuencia, para utilizarlos debemos corregirlos mediante un factor de corrección K, el cual dependerá de la latitud del emplazamiento y del ángulo de inclinación de los paneles.

El factor de eficiencia PR, contiene valores fijos en el tiempo que están relacionados con el buen arte de instalación y la calidad de los equipamientos intermedios, y por otro lado tiene componentes que dependerán del emplazamiento, fundamentalmente de la temperatura del lugar. La Fig. 43 muestra un esquema de las distintas fuentes de pérdida de energía, entre las que se incluyen las pérdidas por temperatura, pérdidas DC, pérdidas en el inversor y pérdidas AC.



**Fig. 43:** Esquema del cálculo de la Energía Generada

Para nuestro trabajo proponemos que dentro del valor de PR los valores fijos no superen el 20%, y que las pérdidas variables en función de la temperatura de la celdano sean superiores a una pérdida de potencia de 0,43% por cada grado de temperatura por encima de los 25 °C. Este último valor es típico para los paneles fotovoltaicos de tecnología basada en silicio multicristalino. En consecuencia, para este informe proponemos un valor de PR que vendrá dado por

$$PR = 0,8 \times [1 - 0,0043 \times (T - 25)] ,$$

donde T es la temperatura, en grados centígrados, que alcanza la superficie del panel.

Finalmente, considerando la corrección en el plano de la radiación y el PR en función de la temperatura del panel, la Ec. 1 queda:

$$E_{AC} = H_{HSP} \times K \times P_{GFV} \times 0,8 \times [1 - 0,0043 \times (T - 25)] . \quad (\text{Ec. 2})$$

En la Tabla3, se muestran los valores de la radiación obtenida en el plano horizontal, los factores de corrección para cada latitud e inclinación de panel, y la temperatura de celda de los paneles que es función de la temperatura ambiente, la radiación y el viento.

	HSP (hs)	Inclinación óptima	K	T (°C)	Horas en el año
<b>Tostado</b>	4,90	26.3°	1,085	48.0	1788
<b>Reconquista</b>	4,86	26.2°	1,085	43.6	1774
<b>Elisa</b>	4,84	27.6°	1,093	43.7	1767
<b>Cañada Rosquín</b>	4,80	28.7°	1,100	42.5	1752
<b>Firmat</b>	4,77	30.0°	1,108	41.1	1741

**Tabla 3:** Valores considerados en el cálculo de la energía generada

Por último, aplicando estos valores en la Ec. 2, y considerando un valor de  $P_{GFV}$  de 5 MW pico, obtenemos los valores de la energía estimada en las cinco localidades.

	<b>Tostado</b>	<b>Reconquista</b>	<b>Elisa</b>	<b>Cañada Rosquín</b>	<b>Firmat</b>
<b>Energía Generada (MWh/año)</b>	<b>6799</b>	<b>6930</b>	<b>6950</b>	<b>6985</b>	<b>7043</b>

**Tabla 4:** Estimación de la energía anual generada por una central fotovoltaica de 5 MWp.

En definitiva, los cambios en la temperatura de la celda compensan las variaciones en la intensidad de radiación solar, haciendo que una planta de 5 MWp ubicada en cualquiera de los cinco emplazamientos genere aproximadamente la misma energía anual, del orden de 6950 MWh/año.

## CONCLUSIONES

Se ha puesto en marcha la Red Solarimétrica de la Provincia de Santa Fe, habiéndose obtenido 18 meses de información de radiación solar y datos climáticos de las distintas Regiones. Hasta el momento los equipos están brindando la información esperada, con algunas dificultades puntuales de funcionamiento y algunos ajustes necesarios. En el futuro, es de esperar que esta red pueda formar parte de una más amplia, que abarque todo el territorio Provincial y se integre a la red Nacional.

Los resultados muestran un buen nivel de radiación en toda la Provincia, con valores similares a los informados por la NASA. El promedio anual de radiación medido para las cinco localidades presenta una variación menor al 3 %, entre 4,90 kWh/m<sup>2</sup>/día para Tostado y 4,77 kWh/m<sup>2</sup>/día para Firmat. Estos valores pueden compararse con la insolación medida para otros países en los cuales la energía fotovoltaica se encuentra más desarrollada. Para Alemania, por ejemplo, los valores de radiación están entre 2,7 y 3,3 kWh/m<sup>2</sup>/día. Aún con este recurso solar relativamente bajo, en Alemania alrededor del 6,9 % del consumo total de electricidad proviene de la energía fotovoltaica. En España, por su parte, los valores de radiación solar están entre 3,3 y 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/día, con gran parte del territorio exhibiendo valores similares a los de la Provincia de Santa Fe. Alrededor del 3 % de la electricidad total consumida en España proviene de la energía solar fotovoltaica, valor que aproximadamente se duplica en el pico de consumo del mediodía. Hoy en día, en la mayoría de los países europeos la energía fotovoltaica compite directamente en costos con otras plantas de generación de energía en el horario pico de consumo del mediodía.

Volviendo a nuestra Provincia, el promedio anual de radiación solar es relativamente uniforme en todo el territorio, como se aprecia en la Fig. 42. Esto hace que, debido a las pérdidas de eficiencia por temperatura que suelen presentar los paneles solares convencionales de silicio multicristalino, las variaciones en la temperatura ambiente compensan a los cambios en intensidad de radiación solar. En consecuencia, en el resultado final de energía total generada por año, todas las plantas generarían cantidades similares de energía dentro del error de la medición, del orden de 6950 MWh/año. Según estadísticas de la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe, con esta cantidad de energía se podrían abastecer unos 4500 hogares que posean un consumo típico para nuestra Provincia. Más aún, para generar 6950 MWh de energía una planta generadora convencional de ciclo combinado emite a la atmósfera unas 3150 Toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que una planta de carbón emite unas 7000 Toneladas de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, resulta claro el ahorro energético y ambiental que podría lograrse adoptando la generación de energía eléctrica a través de centrales fotovoltaicas.

Dado que las normas internacionales aconsejan que, para lograr una medición precisa de la radiación solar, es necesario relevar datos durante un período no inferior a tres años, a medida que se recolecten más datos se podrán tener conclusiones más precisas con respecto a la calidad del Recurso Solar en el territorio provincial y el aprovechamiento factible.

Dr. Javier A. Schmidt  
Grupo de Energías No Convencionales  
FIQ – IFIS-Litoral, UNL – CONNICET