



Identificación del Trabajo	
Área:	Energía
Categoría:	Alumno
Regional:	Santa Fe

Modelado de una micro-fuente fotovoltaica con aporte de potencia eléctrica a una micro-red

Emmanuel SANGOI

Grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Facultad Regional Santa Fe, UTN

E-mail de contacto: esangoi@frsf.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Jorge R. Vega, en el marco del proyecto PID 25/O147 "Técnicas Numéricas de Estimación y Optimización: Aplicaciones en Problemas de Nanotecnología y de Energía Eléctrica".

Resumen

En este trabajo, se implementa el modelo matemático de una celda fotovoltaica policristalina para simular el comportamiento de un panel solar genérico ante variaciones en la irradiancia y la temperatura ambiente. Con el modelo de panel ya validado, se plantea como primer caso de estudio una micro-fuente solar de 9,6 kWp que se conecta directamente a la red de baja tensión. Mediante simulaciones numéricas se analiza tanto el aporte energético como las curvas de potencia eléctrica inyectadas diariamente por este tipo de recurso distribuido. El modelo considera como datos de entrada a la información meteorológica de la ciudad de Santa Fe durante el año 2010. Los resultados permiten entender las características del comportamiento de una micro-fuente de este tipo y son parte de la información necesaria para el modelo dinámico de una micro-red eléctrica.

Palabras Claves: Generación Distribuida; Modelado; Generación Fotovoltaica

1. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

Las micro-redes son esencialmente redes de distribución eléctrica activas y tienen una fuerte participación de generación distribuida. Las fuentes de generación suelen ser una combinación entre convencionales y no convencionales, del tipo renovables o no, en general de pequeña potencia (de allí el nombre de "Micro-Fuentes") y conectadas a la red de distribución en baja tensión mediante una interfaz electrónica de potencia. También cuentan con puntos en donde se almacena o reserva energía [Chowdhury (2009)].

En esencia, la micro-red cuenta con nodos de cargas (usuarios), nodos de generación (micro-fuentes) y nodos de almacenamiento (reservas). La micro-red es comandada por un Controlador Central (CC) que ejecuta un seguimiento y protección general de la red. A través de los Controladores de las Micro-fuentes (MCs), el CC gestiona los ingresos o salidas de generación. Los objetivos del CC son mantener un control de la tensión y frecuencia en la red y asegurar la optimización energética en la misma [Chowdhury (2009)]. Para ello, el CC requiere de información tal como los costos de generación, las tarifas e información regulatoria de la energía, los rendimientos de las micro-fuentes, los pronósticos del clima (en el corto y largo plazo, ya que tanto la generación como la carga varían según el clima y la estación del año), los pronósticos de carga, etc.

En función de su diseño, las micro-redes pueden trabajar en forma aislada o conectadas a la red principal (red de potencia convencional). En este último caso, la micro-red puede tomar de la red de potencia la energía faltante, o vender a ésta su energía sobrante. También puede ofrecer servicios auxiliares tales como aporte de potencia reactiva y regulación de tensión; en algunos casos, además contribuyen a lograr la estabilidad del sistema [Chowdhury (2009)]. También existe la posibilidad de que en función de la generación disponible y de la carga demandada por los usuarios, el CC opte por la conexión a la red principal o por su desconexión (funcionamiento en isla).

La generación solar fotovoltaica tiene un importante potencial en la generación distribuida dentro de una micro-red a nivel residencial y/o comercial. Dependiendo de un estudio de factibilidad, también puede ser relevante su participación a nivel "generación de potencia". En cualquiera de los casos, el CC de la micro-red deberá prever con anticipación los posibles aportes de potencia de las distintas micro-fuentes para gestionar de la mejor manera posible el despacho de la generación disponible.

Los sistemas fotovoltaicos que se conecten directamente a la red constan de paneles solares y de un inversor de corriente que es conectado a la red eléctrica a través de un medidor de energía y su respectivo sistema de control/protección (incluido en el MC). En general, y por una cuestión de costos, estos sistemas no cuentan con acumulación de energía. Se conectan directamente a la red y aportan energía cuando las condiciones climáticas lo permiten. El aporte energético del panel solar depende de la temperatura ambiente y del nivel de irradiancia solar.

En el Grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE), se está comenzando a modelar una micro-red eléctrica de 12 nodos (barras), a la que se conectan micro-fuentes de distintos tipos y demandas eléctricas diversas. Las simulaciones numéricas de esta red permitirán, entre otras cosas, obtener indicadores de calidad de servicio tales como las tensiones en las barras, las pérdidas en las líneas, el porcentaje de generación de energías renovables, etc. En este modelo es de particular importancia conocer la variación de la potencia entregada por las micro-fuentes en su nodo correspondiente a largo del día, del mes y del año, así como también tener presentes sus posibilidades de inyección de potencia en función de las condiciones climáticas (cuando la generación dependa de ello) y conocer su variabilidad en momentos específicos del año (días fríos, calurosos, nublados, etc.). Esta información es relevante para estudiar el comportamiento dinámico de la micro-red.

1.2. *Objetivos*

Implementar en un simulador numérico (en principio, Matlab) un modelo matemático de generación fotovoltaica que permita obtener las curvas de potencia aportada por una micro-fuente fotovoltaica conectada directamente a la red de distribución (posible micro-red), sin acumulación de energía, considerando la variabilidad diaria de la temperatura ambiente y los niveles de irradiancia solar.

Alimentar al modelo con datos meteorológicos reales de la ciudad de Santa Fe (Pcia. de Santa Fe), de modo que el estudio permita predecir el hipotético aporte de un sistema fotovoltaico a una micro-red implementada en la mencionada localidad.

2. **Metodología**

Se estudió el comportamiento de una celda solar policristalina a través del modelo matemático conocido como "modelo de doble diodo" [Chowdhury (2009) y Huan-Liang T. (2008)]. El modelo fue implementado en Matlab.

Partiendo de la naturaleza física, y tal como se muestra en la Figura 1, el modelo considera a la celda fotovoltaica elemental como la asociación en paralelo de una fuente de corriente, una resistencia shunt y dos diodos semiconductores. Estos cuatro elementos se conectan en serie con una resistencia óhmica.

Para este circuito, la relación entre la tensión V y la corriente I en bornes de la celda están dadas por:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{((V+I \cdot R_s)/V_t)} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{((V+I \cdot R_s)/A \cdot V_t)} \right] - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

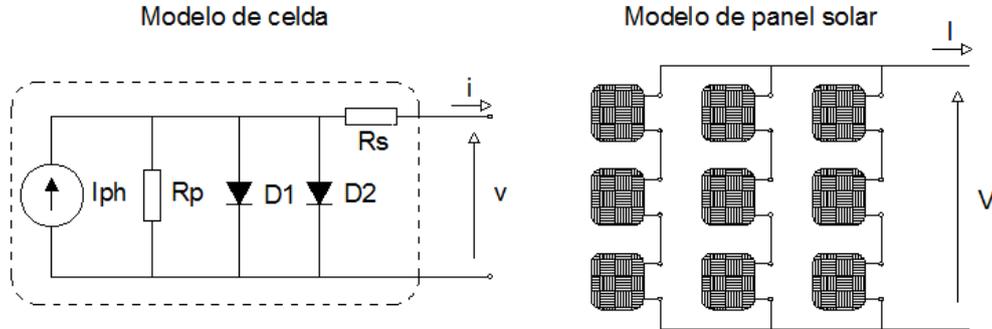


Figura 1. Modelo eléctrico de la celda y del arreglo de celdas para el modelo de panel.

La corriente I_{ph} es la generada por el efecto fotoeléctrico dentro de la celda, y tiene una marcada dependencia con el nivel de irradiancia solar. Las corrientes I_{s1} e I_{s2} son las corrientes de saturación inversa de cada diodo y dependen de los valores de temperatura ambiente. La tensión V_t es la tensión equivalente térmica de cada diodo y A es el coeficiente de emisión del diodo D2.

La resistencia R_p considera al efecto de las corrientes de fuga que se dan en la celda, mientras que R_s simula el efecto de las distintas resistencias internas de contacto y que generan caídas de tensión dependientes de la corriente emitida.

Los valores de I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , R_s y R_p varían según la irradiancia solar E y la temperatura ambiente T . Estos valores se calcularon con el empleo de 13 constantes (K_0 a K_{12}) y considerando las relaciones matemáticas empíricas obtenidas en trabajos de caracterización experimental para celdas policristalinas [Chowdhury (2009)].

$$I_{ph} = K_0 \cdot E \cdot (1 + K_1 \cdot T) \quad (2)$$

$$I_{s1} = K_2 \cdot T^3 \cdot e^{(K_3/T)} \quad (3)$$

$$I_{s2} = K_4 \cdot T^{1.5} \cdot e^{(K_5/T)} \quad (4)$$

$$A = K_6 + K_7 \cdot T \quad (5)$$

$$R_s = K_8 + \frac{K_9}{E} + K_{10} \cdot T \quad (6)$$

$$R_p = K_{11} \cdot e^{K_{12} \cdot T} \quad (7)$$

En base a la celda fotovoltaica, se conformó el modelo matemático de un panel solar típico, asociando N_s celdas en serie y N_p celdas en paralelo, según la potencia y la tensión del panel solar (ver Figura 1). Se supuso que el error cometido al considerar que la tensión del panel es N_s veces la tensión de la celda y la corriente del panel es N_p veces la corriente de cada celda, es despreciable. De esta manera, el modelo permite conformar distintos paneles, asociando de distinta manera a las celdas fotoeléctricas elementales. Conociendo el valor de potencia pico y la tensión a potencia pico del panel (referidos a condiciones estándar de ensayo, es decir, 1000 W/m² y 25 °C), las simulaciones permiten obtener las distintas curvas características del panel ante variaciones en la temperatura ambiente e irradiancia solar, que a su vez pueden compararse con las provistas por el fabricante.

Dada la importante cantidad de parámetros empíricos necesarios (13 constantes experimentales), también se llevó a cabo un estudio de la sensibilidad paramétrica del modelo,

para poder efectuar futuros ajustes sobre los resultados del mismo. El estudio permite cuantificar la influencia de cada parámetro sobre los valores característicos del panel solar modelado.

Para comprobar la efectividad del modelo, se validaron los resultados y curvas características de panel simulado comparándolos con los datos provistos en la ficha técnica de dos fabricantes distintos. Para ello, se consideró el comportamiento de sus parámetros más importantes ante variaciones en la potencia nominal del panel, en las condiciones de irradiancia solar y en la temperatura ambiente. Las variables de contraste fueron: potencia pico (P_m), tensión y corriente a potencia pico (V_{pm} e I_{pm} respectivamente), tensión de vacío (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}).

Como se mencionó, los paneles solares se conectan a la red eléctrica a través de un inversor (convertor DC/AC). Por ello, se modeló también el efecto del inversor sobre la potencia de salida de un conjunto de paneles conectados a la red. En efecto, se contempló la variación en el rendimiento del inversor según su estado de carga y la modificación de amplitud en el fasor de tensión según la cantidad de potencia inyectada a la red [Cáceres et al. (2010)]. El modelo considera que la potencia entregada tiene un factor de potencia unitario y que se inyecta a la red toda la energía generada.

Respecto de la información de entrada al modelo, se procesaron los valores de irradiancia solar y temperatura ambiente para la ciudad de Santa Fe durante los 365 días del año 2010. Los datos fueron provistos por el Centro de Información Meteorológica (CIM), de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. Como resultado se obtuvo el valor de los mencionados parámetros hora a hora para cada día del año.

Una vez validado el modelo del panel y procesado los datos de irradiancia y temperatura ambiente para Santa Fe, se planteó un primer caso de estudio. Para ello, se consideró una micro-central de generación fotovoltaica de 9,6 kWp (kiloWatt pico), que bien podría abastecer el consumo de un pequeño edificio residencial o comercial, según su diseño. El modelo está compuesto por el arreglo de 40 paneles solares policristalinos de 240 W cada uno y en una disposición de 2 líneas en paralelo de 20 paneles en serie cada una. Como referencias del modelo, se usaron los datos de un panel marca Kyosera, modelo KD240GH-2PB. En un cálculo aproximado, considerando las dimensiones de este panel (1662 mm x 990 mm), el arreglo ocuparía una superficie cercana a los 66 m².

La simulación supone que los paneles se conectan directamente a la red eléctrica a través de un inversor de corriente trifásico. El sistema planteado no posee acumulación de energía y se asume que cuenta con un sistema seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). El inversor elegido para los valores de referencia en el modelo es un inversor trifásico, marca Refusol, modelo 013K, de 12,4 kVA de potencia nominal.

Finalmente, se simuló el comportamiento de la micro-fuente fotovoltaica para los días promedio de cada mes del año 2010, para los 3 días más calurosos del verano, para los 3 días más fríos del invierno, para distintos días nublados de enero y junio, y para los días de máxima y mínima irradiancia solar. A tales efectos, se consideró como objeto de estudio a las curvas de potencia eléctrica entregada a la red de distribución por el sistema planteado y a la tensión y corriente en bornes del inversor (tanto del lado DC como del lado AC). También se evaluó la influencia de la temperatura ambiente sobre el comportamiento de la micro-fuente, para iguales niveles de irradiancia solar.

3. Resultados

3.1. Modelo del panel solar

La Figura 2 muestra las curvas características obtenidas en la simulación de un panel solar de 240 W. El modelo requiere como datos la potencia del panel y la tensión en el punto de máxima potencia, a 25 °C y 1000 W/m² (datos obtenidos de la ficha técnica). En este caso, resulta $P_m = 240 \text{ W}$ y $V_{pm} = 29,8 \text{ V}$.

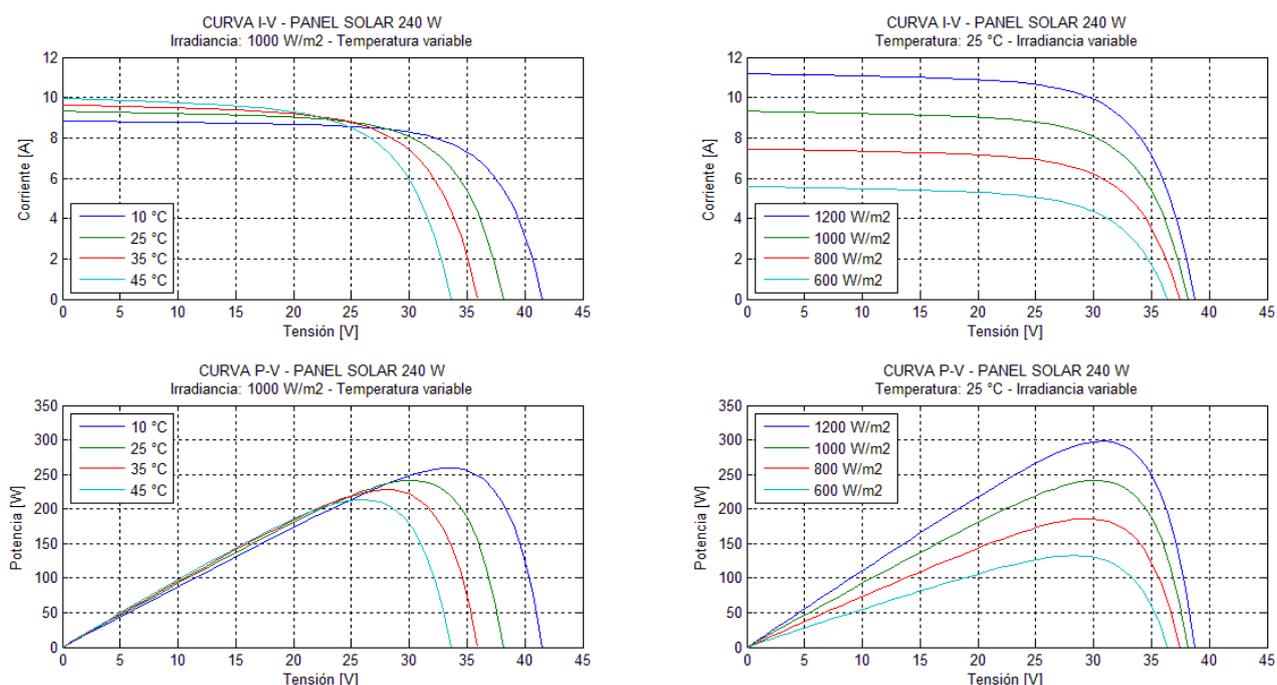


Figura 2. Curvas características obtenidas en el modelo del panel solar de 240 W

Los resultados de la validación con distintos paneles policristalinos del mercado indicaron que el modelo se ajusta aceptablemente (con errores bajos) al comportamiento real de un panel comercial. En la Tabla 1 se detallan los resultados obtenidos en la comparación con un panel de 240 W, marca Kyosera, modelo KD240GH-2PB.

Tabla 1. Resultados de la validación - modelo de un panel solar de 240 W

Panel solar 240 W - Validación por variación de temperatura									
Parámetros a 1000 W/m ²	5 °C			25 °C			45 °C		
	Fabric.	Modelo	Error [%]	Fabric.	Modelo	Error [%]	Fabric.	Modelo	Error [%]
Pm [W]	262	264,4	0,9	240	240,8	0,3	218	212,9	-2,3
Voc [V]	39,56	42,6	7,6	36,9	38,1	3,3	34,24	33,6	-1,9
Isc [A]	8,487	8,7	2,2	8,59	9,3	8,5	8,693	10,0	14,6

Panel solar 240 W - Validación por variación de irradiancia solar									
Parámetros a 25 °C	1000 W/m ²			600 W/m ²			200 W/m ²		
	Fabric.	Modelo	Error [%]	Fabric.	Modelo	Error [%]	Fab.	Modelo	Error [%]
Pm [W]	240	240,8	0,3	133,4	132,2	-0,9	39,2	33,54	-14,4
Vpm [V]	29,8	29,7	-0,3	29	27,9	-3,8	28	23,4	-16,4
Ipm [A]	8,06	8,1	0,6	4,6	4,7	3,0	1,4	1,4333	2,4
Voc [V]	36,9	38,1	3,3	36,2	36,3	0,4	34,5	31,9363	-7,4
Isc [A]	8,59	9,3	8,5	5,2	5,6	7,5	1,65	1,8633	12,9

Si se consideran los parámetros de mayor interés para el estudio, a saber: P_m , V_{pm} e I_{pm} , se observa que los errores se incrementan al alejarse de las condiciones estándar de ensayo (25 °C y 1000 W/m²). La variación en la temperatura ambiente genera errores bajos en el modelo. En lo referente a las variaciones de la irradiancia solar, los errores son relativamente altos (~15%) sólo para condiciones de irradiancia muy baja. Estos resultados son similares en modelos para paneles de 135 W, 185 W y 215 W del mismo fabricante.

El estudio de sensibilidad paramétrica del modelo indica que los parámetros más influyentes sobre las variables de interés son: K_0 , K_1 , K_3 , K_5 y K_7 , con lo cual, en una futura mejora del modelo, se deberán ajustar estos parámetros.

3.2. Niveles de irradiancia y temperatura ambiente en la ciudad de Santa Fe

La Figura 3 muestra el comportamiento anual en las dos variables de entrada más importantes del modelo durante 2010. La Tabla 2 resume los valores principales de irradiancia y temperatura ambiente.

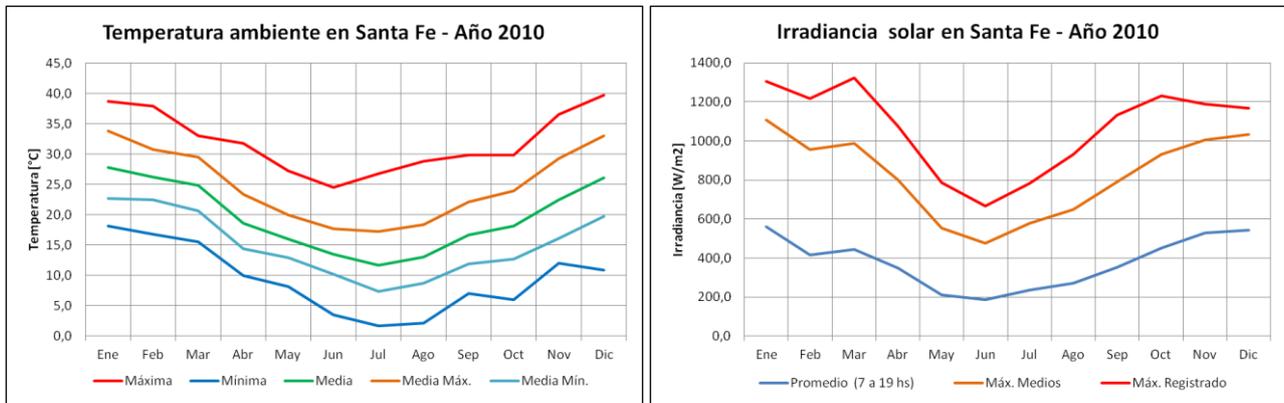


Figura 3. Variación anual de la temperatura ambiente e irradiancia solar para Santa Fe

Tabla 2. Resumen de la información meteorológica procesada para el año 2010

Temperatura ambiente Año 2010 - [°C]		Irradiancia Solar Año 2010 - [W/m ²]	
Promedio	19,6	Promedio	205,9
Máxima (Diciembre)	39,7	Promedio en horas de luz (7 a 19 hs)	379,0
Mínima (Julio)	1,7	Media Máxima	822,5
Media Máxima	24,9	Máximo registrado (Marzo)	1323,0
Media Mínima	15,0		

Prácticamente, la temperatura ambiente de Santa Fe varió entre 2 °C y 40 °C a lo largo del año. Las temperaturas más altas se dieron en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero; las mínimas temperaturas se dieron en los meses de junio, julio y agosto.

En general, los niveles máximos y mínimos de irradiancia solar coinciden con los meses de mayor y menor temperatura. Los valores más altos de cada mes variaron entre 666 W/m² (junio) y 1323 W/m² (marzo). En 4 de los 12 meses del año la irradiancia máxima promedio fue mayor o casi igual a los 1000 W/m².

3.3. Modelo de la micro-fuente fotovoltaica

El modelo contempla la asociación matemática de 40 paneles solares, conformando una potencia pico nominal de 9,6 kW (definidos para 1000 W/m² y 25 °C). El modelo de cada panel es el detallado con anterioridad. Los resultados del aporte de energía mensual a la red eléctrica y la potencia máxima promedio generada en cada mes se muestran en la Figura 4. Estos valores se contrastan además con los niveles de irradiancia solar de cada mes.

Considerando los datos del año 2010, el sistema fotovoltaico planteado aportaría a la red eléctrica aproximadamente unos 14.930 kWh de energía (anual). Si se consideran además los niveles de irradiación solar global diarios para cada mes del año (energía solar, en kWh/m²) y se tiene en cuenta la superficie de captación planteada, los paneles reciben una energía total aproximada de 118.402 kWh, lo cual se traduce en un rendimiento de la micro-fuente fotovoltaica planteada del 12,6 %.

Dada la fuerte dependencia de la energía generada con los niveles de irradiancia solar, los meses de mayor generación son (en orden descendente): enero, diciembre, noviembre, octubre, y marzo.

El mes de mayor generación energética es enero, con el 12,72% de la energía anual aportada a la red. En cambio, el de menor generación energética es junio, con el 3,81%. Si se considera el aporte por estación, la primavera representaría el 34 % del aporte anual, seguido por el verano, con el 31%.

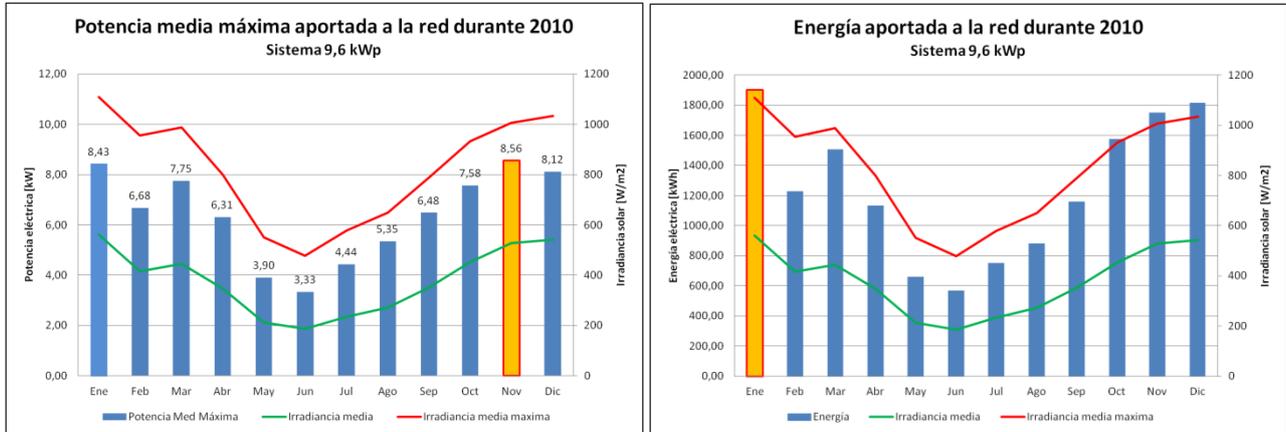


Figura 4. Potencia y energía aportada a la red

En promedio, los máximos aportes de potencia eléctrica a la red se darían durante noviembre, con el 89,2 % de la potencia nominal del sistema. El mínimo aporte se daría en junio, con el 34,7% de la potencia nominal. Si se considera al día de máxima irradiancia solar registrado en 2010, el aporte de potencia pico al sistema sería de 12,8 kW, que representa el 133 % de la potencia nominal de la micro-fuente. Considerando los promedios mensuales, los aportes de potencia pico se darían siempre entre las 12:00 y las 14:00 hs. En la mayoría de los casos (7 de los 12 meses), el pico de potencia se daría a las 13:00 hs.

En el mes de enero, en promedio, la potencia eléctrica generada superaría el kW entre las 8:30 hs y las 18:45 hs aproximadamente (10,25 hs de aporte), mientras que en junio, dicho aporte se daría entre las 9:45 hs y las 16:30 hs (6,75 hs de aporte).

La Figura 5 (izquierda) compara las curvas de potencia promedio aportadas a la red por el sistema fotovoltaico planteado para cada mes de 2010. Los meses de mayor y menor aporte energético son enero y junio, respectivamente. La Figura 5 (derecha) muestra el comportamiento de la microfuelle fotovoltaica para algunos días nublados de enero.

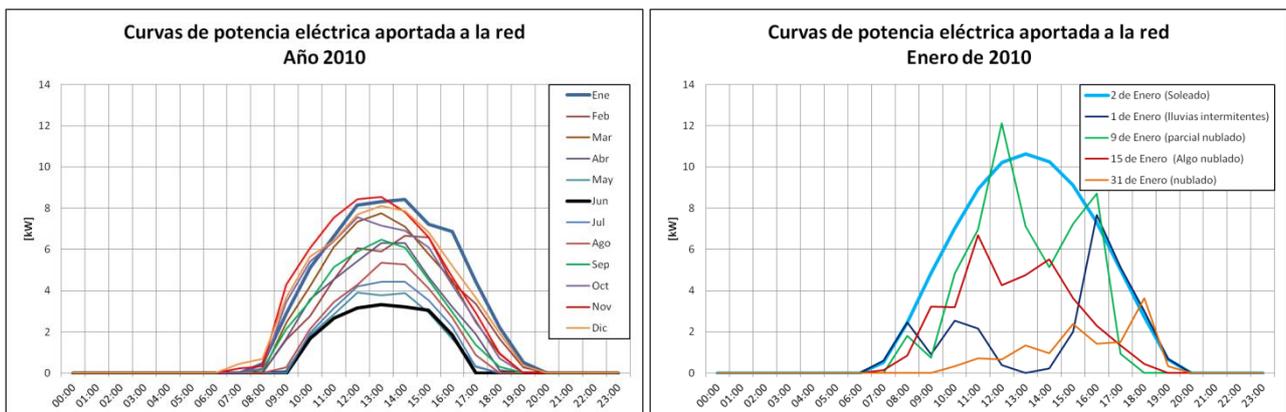


Figura 5. Resultado de las simulaciones - Curvas de potencia diaria aportada a la red

La potencia entregada es altamente dependiente de los niveles de irradiancia solar. Tal es así que en los días con nubosidad parcial la potencia entregada decae según el nivel de sombra que se haga sobre los paneles. En la Tabla 3 pueden observarse los aportes energéticos a la red en cada caso.

La temperatura ambiente juega un papel relativamente importante en lo que hace a la generación energética. Para dos días del año con iguales nivel de irradiancia solar, pero con las temperaturas del día más frío del año en el primer caso y con las temperaturas del día más caluroso en el segundo, la energía susceptible de ser generada por la micro-fuente decae en un 13,6 %, mientras que la potencia pico decae en un 11,9 %.

Tabla 3. Aportes de potencia y energía en días nublados

Enero de 2010	02-01-2010 (soleado)	01-01-2010 (lluvias intermitentes)	09-01-2010 (parcial nublado)	15-01-2010 (algo nublado)	31-01-2010 (nublado)
P med. entregada a la red [kW]	3,3	1,2	2,3	1,5	0,6
P máx. entregada a la red [kW]	10,6	7,7	12,1	6,7	3,6
Energía entregada a la red [kWh]	79,7	27,8	55,6	36,3	13,2

4. Conclusiones

El modelo empírico de doble diodo para celdas policristalinas es adecuado para describir el comportamiento de los paneles comerciales considerados. Eventualmente, podrían hacerse ligeros ajustes modificando algunos de los 5 parámetros más influyentes determinados en el estudio de sensibilidad paramétrica del modelo. También podría estudiarse la posibilidad de simplificar el modelo de doble diodo o bien reemplazarlo por otro con menos parámetros, con el fin de lograr menores tiempos de simulación. Los errores obtenidos en la asociación de celdas en serie y paralelo para conformar un panel no generaron errores apreciables.

Los resultados obtenidos en el trabajo sirven como aporte al estudio del comportamiento de la micro-red modelada dentro del grupo, cuando una o varias de sus fuentes son del tipo fotovoltaica. Al considerar el aporte de potencia a la micro-red por parte de una fuente fotovoltaica, deberá tenerse en cuenta su amplia dependencia con las condiciones de nubosidad. La curva de potencia diaria entregada a la red tiene la misma forma de variación que la curva de irradiancia solar. Para una fuente fotovoltaica de pequeñas dimensiones como la modelada, debería estudiarse además la posibilidad de implementar un sistema para acumulación de energía, que permita suavizar los cambios bruscos producidos en la generación ante nubosidades parciales.

Al considerar micro-fuentes fotovoltaicas de mayor potencia, es importante estudiar la variabilidad instantánea (en el orden de los minutos) de la potencia aportada durante condiciones de nubosidad variable y su influencia en la estabilidad de la micro-red.

La capital de Santa Fe posee niveles de irradiancia solar considerables para la conformación de micro-fuentes de generación fotovoltaica con posibilidades de conexión directa a la red eléctrica principal o a una posible micro-red. Para complementar a los resultados obtenidos, se debería agregar un estudio económico que contemple la amortización de este tipo de instalaciones y su viabilidad económica.

Como trabajos a futuro se plantea validar el modelo de panel con otros fabricantes del mercado, aumentar la potencia de la microfuentes modelada, considerar el efecto de la inclinación de los paneles, mejorar el modelo del inversor, (considerando también el limitado aporte de potencia reactiva) y efectuar una valoración económica de este tipo de recurso distribuido.

Bibliografía

- Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P. (2009). "Microgrids and Active Distribution Networks", The Institution of Engineering and Technology, London, U.K. ISBN: 978-1-84919-014-5.
- Huan-Liang T., Ci-Siang T., and Yi-Jie S., (2008), Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, World Congress on Engineering and Computer Science 2008, San Francisco, USA
- Cáceres M., Pinto E., Busso A., Cadena C., Vera L., (2010), Modelo matemático para simular la interacción entre un sistema de generación fotovoltaica y la red de baja tensión, ASADES, ISSN 0329-5184