

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED: ESTABILIDAD EN LOS PARÁMETROS DE LA RED Y SUS EFECTOS EN LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN.

Manuel Cáceres – mcaceres@ger-unne.com.ar

Arturo J. Busso – ajbusso@ger-unne.com.ar

Luis H. Vera – lvera@ger-unne.com.ar

Andrés Firman – afirman@ger-unne.com.ar

Guillermo Leiva – gleiva@ger-unne.com.ar

Lisandro Luque – lluque@ger-unne.com.ar

Universidad Nacional del Nordeste, Departamento de Física, Grupo en Energías Renovables (GER).

Resumen. Con el objeto de evaluar la influencia que tiene la variación de los parámetros característicos de la red de baja tensión en la eficiencia global de un sistema fotovoltaico conectado a red (SFCR), el Grupo en Energías Renovables (GER) desarrolló un modelo matemático que permite predecir la interacción red-SFCR. En este estudio se presenta por un lado, el desarrollo del modelo matemático citado y por otro, la metodología empleada para determinar la calidad de la energía inyectada por un SFCR. Se presentan y comparan los resultados obtenidos por simulación y los adquiridos en forma experimental durante 15 meses de funcionamiento. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que, en la evaluación de la disminución en la capacidad de generación del SFCR, el desvío máximo cometido por el modelo matemático desarrollado es menor al 2%, que la disminución en la eficiencia global del sistema instalado es del 20% y que para mejorar esta eficiencia es suficiente con introducir modificaciones en los rangos de trabajo del inversor para conexión a red.

Palabras clave: Energía Solar Fotovoltaica, Inversores para SFCR, Red de baja tensión

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación fotovoltaica acoplados a red (SFCR) se presentan en la actualidad como una alternativa para el desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica renovable y limpia. El empleo de este tipo de sistemas para abastecer la demanda de energía eléctrica en el mundo crece a una tasa anual de un 25%. Un claro ejemplo de esto es el caso de Alemania, que instaló un total de 7,406 MW de generación fotovoltaica solamente durante el año 2010 sumando una capacidad de generación fotovoltaica mundial de 50 GW a fines del año 2010 (REN21, 2011). También existe un continuo crecimiento del uso de SFCR para abastecimiento de energía eléctrica en otros países como España, China, Japón, Estados Unidos y, en Latinoamérica, México, Perú, Brasil entre otros (IEA, 2010) (U.S. Department of Energy, 2010) (Zilles, 2009).

En la Argentina, a los efectos de fomentar el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de electricidad, se sancionó la ley Nacional N° 26.190 en el año 2006 (reglamentada en el año 2009), la misma, a través de tarifas premium, promueve, entre otros métodos de generación, el empleo de sistemas fotovoltaicos. Sobre las bases de esta ley y en el marco de un programa de incentivo a las energías no convencionales denominado GEN-REN, en la provincia de San Juan - Argentina, en Marzo de 2011, comenzó a funcionar la primer planta solar de Latinoamérica con una capacidad de generación de 1,2 MWp; potencia que será ampliada a 20MW (Morán et al., 2009).

Los SFCR cuya potencia instalada supera 100 kW son denominados comúnmente como sistemas de *generación centralizada*, mientras que los sistemas cuya capacidad de generación se encuentra por debajo de este valor se denominan de *generación distribuida* (GD) (IEA, 2010). La ventaja del empleo de SFCR para implementar GD, frente a los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica, radica en que pueden ser instalados en puntos estratégicos de la red de baja tensión (BT) donde los picos de demanda superan la capacidad de suministro, ocasionando distorsión en sus parámetros, sobrecarga de las líneas de distribución, disminución en los niveles de tensión, etc. Debido a su carácter modular, los SFCR pueden ser acoplados arquitectónicamente a edificios existentes (Chivelet et al., 2009) y poseen una elevada confiabilidad ya que no requieren de partes móviles para funcionar. De esta forma, la instalación de SFCR mejora las condiciones de la red sin necesidad de realizar grandes inversiones en obras de distribución eléctrica. Por otra parte, en la Argentina, la GD convencional se implementa mediante sistemas de generación que emplean combustibles fósiles (Soracco, 2008) los que pueden ser sustituidos en gran proporción mediante la conexión de SFCR, cuya energía de carácter renovable y limpia, permite reducir las emisiones y el impacto ambiental provocado por las mismas.

A los efectos de realizar un estudio sobre la implementación y el impacto de la GD utilizando SFCR en las redes de BT de la ciudad de Corrientes – Argentina, el Grupo en Energías Renovables (GER) diseñó e instaló un sistema demostrativo de 525 Wp (potencia pico) en el edificio del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (latitud sur 27° 27'; longitud oeste 58° 49'). Con el objeto de brindar versatilidad a la hora de evaluar el sistema se diseñó un generador fotovoltaico de 1200 Wp constituido a partir de 24 módulos fotovoltaicos (FV) de 50 Wp marca Photon modelo PM050. El generador está constituido por 4 paneles de 6 módulos en serie. Los 4 paneles se conectan en paralelo en un tablero de distribución que permite configurar en forma sencilla el generador a utilizar durante cada ensayo que se requiera realizar. El generador

se encuentra montado sobre los parasoles del edificio con un ángulo de inclinación igual a 27° . Por otra parte se instaló un inversor para conexión a red marca Mastervolt, modelo Soladin 600 cuya potencia nominal es de 525W. Este sistema fue caracterizado por Cáceres et al. (2011) y Bello et al. (2009) y se encuentra en funcionamiento desde el mes de diciembre del año 2010.

Comportamiento de la red de BT. En la región norte de la Argentina los niveles de tensión eficaz en las redes de BT presentan una elevada variación a lo largo del día que es función del perfil de energía demandada. Esta variación se ha acentuado durante el año 2011 debido a la gran cantidad de equipos de acondicionamiento térmico que se han instalado. Este efecto se verifica, en mayor medida, durante las estaciones que presentan mayor temperatura ambiente (Primavera - Verano) y durante los períodos diarios comprendido entre las 10 h y las 16 h (MinPlan, 2010) (CNEA, 2010). El pico de demanda ocasionado por este tipo de cargas produce una disminución en los niveles de tensión durante estos períodos. Los SFCR por su parte, poseen un período de generación que coincide con el período de máxima demanda y, por tanto, permiten allanar las variaciones en las tensiones de redes que se encuentran sobrecargadas brindando una mayor estabilidad a las mismas. Como prueba de ello, Moran et al., (2010) presenta un estudio que evalúa los efectos producidos, en los niveles de tensión, por la instalación de SFCR en puntos estratégicos de la red de BT y demuestra como, la inclusión de este tipo de sistemas de generación intermitente en la matriz eléctrica eleva los niveles de tensión de la misma.

Interacción SFCR-red. El dispositivo encargado de vincular el sistema de generación fotovoltaica con la red de BT es el inversor. Este dispositivo transforma la corriente continua proviene del generador FV en señales de corriente alternada con características adecuadas para inyectar energía a la red. Por otra parte, el inversor posee las protecciones que evitan inyectar energía en condiciones de corte del suministro o por variaciones en los niveles de tensión y frecuencia de la red. En particular, el inversor Mastervolt Soladin 600 posee rangos fijos de trabajo respecto de la tensión y de la frecuencia de la red. Para el caso de la tensión el fabricante del inversor establece un rango de trabajo comprendido entre 207 V y 253 V y para la frecuencia entre 49,8 Hz y 50,2 Hz. Si los valores que adoptan los parámetros de la señal de tensión de la red están fuera de estos rangos preestablecidos el inversor interrumpe el suministro de energía. En aquellas redes que presentan cierta inestabilidad, como el caso de la red del norte Argentino (MinPlan, 2010), este hecho ocasiona una disminución en la energía que efectivamente es entregada por el SFCR; resultando en una disminución en la eficiencia global del sistema.

Existen estudios que permiten evaluar estos efectos mediante la determinación de índices globales (definidos según la norma IEC 61724) calculados a partir de valores adquiridos experimentalmente por medición de los parámetros de funcionamiento del sistema (Pietruszko S M, Gradzki M, 2003). También se han desarrollado modelos probabilísticos que permiten predecir esta interacción. Cáceres et al., (2010) propone un modelo matemático que permite simular la interacción red-SFCR para intervalos de tiempo suficientemente pequeños (<1 s) con el objeto de evaluar los efectos de transitorios resultando inadecuado para determinar efectos a largo plazo.

Con el fin de evaluar los efectos de la inestabilidad de la red en capacidad de generación de SFCR, el GER desarrolló modelo matemático que fue verificado con valores adquiridos.

En este estudio se presenta el modelo matemático que permite realizar el análisis citado desarrollado en el entorno de programación Matlab (Matlab, 2010). Este modelo es complementario al presentado por Cáceres et al, (2010) puesto que permite realizar simulaciones para períodos de tiempo prolongados a diferencia del citado que permite realizar evaluaciones de la interacción red-SFCR para períodos transitorios. Por otra parte, se presenta la metodología adoptada para adquirir valores experimentales de los parámetros de funcionamiento que permiten validar el modelo, los resultados obtenidos mediante simulación para 8 semanas donde la disminución en la capacidad de generación es elevada y un resumen de los valores promedios de las variables que caracterizan el funcionamiento del SFCR instalado.

2. MODELO MATEMÁTICO DE SFCR

Un SFCR está constituido por dos subsistemas, el generador fotovoltaico (FV) y el inversor para conexión a red. La función que cumple cada uno de ellos dentro del sistema puede ser representada mediante modelos matemáticos gobernados por parámetros de ajuste que dependen de la configuración adoptada. Se han desarrollado modelos matemáticos que permiten representar el comportamiento de cada uno de los componentes de un SFCR por separado y cuyos parámetros de funcionamiento pueden ser ajustados a partir de datos experimentales (Vera, 2004). Estos modelos resultan de utilidad al momento de evaluar y predecir el comportamiento general del sistema para diferentes condiciones de funcionamiento. Para el estudio en cuestión, se determinó un modelo simple constituido por módulos individuales de procesamiento que representan a cada uno de los componentes del sistema. Los mismos se acoplan entre sí y permiten determinar la disminución en la capacidad de generación de un SFCR.

2.1 Modelo matemático de arreglo fv

Se desarrolló un modelo de arreglo fotovoltaico a partir del modelo equivalente eléctrico de módulo FV de cinco parámetros presentado por (Firman et al., 2011) y descrito en la Ec. (1). Esta ecuación depende de diferentes parámetros, a saber, el factor de idealidad del diodo (m), la corriente de cortocircuito (I_{SC}), la tensión de circuito abierto V_{OC} , la resistencia serie (R_s), la resistencia paralelo (R_p), el número de celdas conectadas en serie (N) y el potencial

térmico del diodo (V_t) que depende de la temperatura de celda (T_c). Para este estudio se consideró un modelo simple a los efectos de optimizar el tiempo de cálculo y evaluar la disminución en la eficiencia global del sistema.

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{OC} + IR_S}{NmV_t} \right) \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1)$$

Mediante la Ec. (1) se pueden ajustar las características corriente vs. tensión y potencia vs. tensión del módulo. Considerando que un arreglo FV se implementa a partir de la conexión eléctrica en paralelo de un número de N_p de N_s módulos fotovoltaicos conectados en serie, modificando la Ec. (1) convenientemente se pueden aproximar, mediante ajuste, las características citadas para todo el generador fotovoltaico como función de la radiación y la temperatura de celda (Firman et al., 2011).

Por otra parte, a los efectos de simplificar el estudio se utilizó una ecuación presentada en (Vera, 2004) para determinar la temperatura de celda a partir de la temperatura ambiente (Ec. (2)) eliminando de esta forma la necesidad de evaluar la temperatura de cada una de las celdas del arreglo. Esta ecuación requiere del valor de temperatura nominal de operación de la celda (NOCT) que puede ser calculada promediando valores adquiridos experimentalmente de la temperatura de celda (cuando la misma esta a circuito abierto), en un ambiente a temperatura de 20°C, sobre ella inciden 800 W/m² de irradiancia y a 1 m/s de velocidad viento constante.

$$T_{cel} = T_{aire} + \frac{NOCT - 20^\circ C}{800} G \quad (2)$$

donde: T_{cel} = Temperatura de la celda FV en °C; T_{aire} = Temperatura ambiente en °C; G = Irradiancia solar en W/m².

2.2 Modelo matemático de inversor para conexión a red

Cuando el SFCR genera energía eléctrica, el inversor para conexión a red polariza al arreglo en el punto de máxima potencia a partir de un sistema de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT). De esta forma, la potencia suministrada por el generador fotovoltaico es la máxima disponible para cada condición de irradiancia y temperatura dada siendo este el valor de salida del modelo matemático de arreglo FV propuesto.

Los parámetros que definen el funcionamiento del inversor en términos de energía son la eficiencia de conversión y la eficiencia de seguimiento de punto de máxima potencia. La eficiencia de conversión es la relación que hay entre la energía que el inversor inyecta a la red y la energía que entrega el generador fotovoltaico. La diferencia entre ambas es la energía que se pierde en el inversor. Las pérdidas de energía que se producen en el inversor son función de la potencia de operación del mismo, y responden a una ecuación de segundo orden. Según Rampinelli et al., (2010) la eficiencia de conversión de un inversor para conexión a red viene dado por la Ec. (3). Los coeficientes de esta ecuación de eficiencia (K_0 , K_1 y K_2) pueden ser ajustados a partir de valores adquiridos experimentalmente de la potencia entregada por el generador FV al inversor e inyectada a la red en diferentes condiciones de operación.

$$\eta = \frac{P_O}{P_O + (K_0 + K_1 \cdot P_O + K_2 \cdot P_O^2)} \quad (3)$$

con: P_O = Potencia de salida del inversor normalizada a la potencia nominal.

Para determinar la eficiencia del MPPT deben considerarse dos factores, uno denominado eficiencia dinámica y otro denominado eficiencia estática. En inversores comerciales la eficiencia global del MPPT, es decir el producto de los factores citados, ronda el 99% y no se modifica sustancialmente en condiciones de operación comprendidas entre el 20% y 100% de la potencia nominal (Rampinelli et al., 2010)

El modelo de inversor desarrollado incluye ambas eficiencias y requiere como datos de entrada, además de los parámetros que caracterizan a las mismas, de la amplitud y frecuencia de la señal de tensión.

De esta forma, el modelo de generador FV calcula la potencia generada por el arreglo para cada condición de radiación y temperatura ambiente, el modelo de inversor modifica este perfil de potencia en función de las eficiencias citadas y a partir de la frecuencia y amplitud de la tensión de red.

La Fig. 1 presenta un diagrama de bloques del modelo matemático desarrollado. Como se muestra en la figura el modelo de arreglo FV requiere de parámetros característicos (en condiciones normalizadas) de uno de los módulos FV que constituyen el arreglo y de los parámetros de configuración del arreglo tales como, la resistencia serie (R_S), la resistencia paralelo (R_P), el número de módulos en serie (N_S) de cada rama, el número de ramas en paralelo (N_P) y la NOCT. Las variables de entrada para este modelo son la radiación solar y la temperatura ambiente. El modelo de inversor, por su parte, requiere de un cierto número de parámetros característicos (constantes del equipo) tales como la potencia nominal (P_{nom}), la tensión eficaz nominal (V_{nom}), la frecuencia nominal (F_{nom}), los límites superior e

inferior admitidos en la tensión eficaz de operación (V_{sup} y V_{inf}), los límites superior e inferior admitidos en la frecuencia de operación (F_{sup} y F_{inf}), los coeficientes de ajuste de la ecuación de eficiencia de conversión (K_0 , K_1 y K_2) y la eficiencia global del sistema seguidor de punto de máxima potencia (η_{MPPT}). Las variables de entrada son la evolución temporal de la amplitud y frecuencia de la señal de tensión de la red. El modelo completo determina la potencia inyectada efectivamente a la red, y la potencia disponible para el período simulado. Con estos valores de potencia puede calcularse la energía generada y disponible en el SFCR y evaluar la disminución en la capacidad de generación para diferentes condiciones de operación.

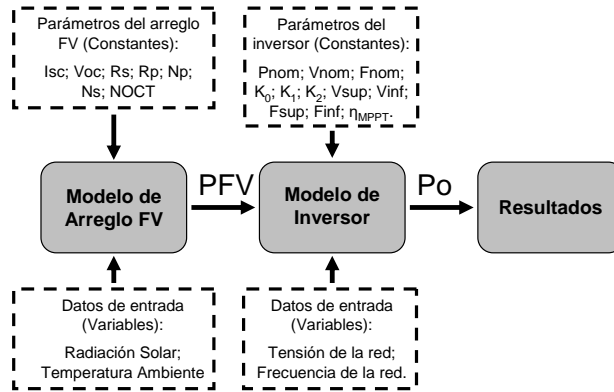


Figura 1 – Diagrama de bloques del modelo matemático de SFCR para evaluación de la capacidad de generación.

2.3 Parámetros empleados en la simulación del SFCR

Con el objeto de evaluar la disminución en la capacidad de generación del SFCR instalado por el GER se realizó una simulación del sistema para un período de 8 semanas comprendido entre los meses de Febrero y Abril del año 2012. La Tab. 1 presenta los valores que adoptan los parámetros de configuración requeridos por el modelo.

Tabla 1. Parámetros empleados en el modelo matemático para simulación del SFCR durante un período de tiempo de 8 semanas comprendidas entre los meses de Febrero y Abril del año 2012.

PARÁMETRO	VALOR	PARÁMETRO	VALOR
I_{SC}	3,02 A	F_{nom}	50 Hz
V_{OC}	21,5 V	V_{sup}	253 V
R_S	0,97 Ω	V_{inf}	210 V
R_P	341,01 Ω	F_{sup}	50,2 Hz
N_S	5	F_{inf}	49,8 Hz
N_P	2	K_0	0,00842
$NOCT$	43 °C	K_1	0,06
P_{nom}	525 W	K_2	0,0384
V_{nom}	220 V	η_{MPPT}	0,99

3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA MEDIR LA ENERGÍA GENERADA POR EL SFCR

La medición y adquisición de los parámetros de funcionamiento del SFCR se realizó cumpliendo con las pautas establecidas en la norma IEC 61724. Para este estudio en particular resultó pertinente evaluar las características de la energía generada por el sistema e inyectada a red y su relación con los parámetros de la red de baja tensión, la temperatura ambiente y la irradiancia que incide sobre el generador FV.

Para evaluar las características de la energía generada, se utilizó un analizador de redes comercial que posee una exactitud media del 1%. Este instrumento permite medir el valor eficaz y la frecuencia tanto de la señal de tensión de la red como de la corriente inyectada por el inversor, el desfase entre ambas señales, el factor de potencia, la potencia activa, reactiva y aparente y las energías activa, reactiva y aparente acumuladas durante el período de medición. Además calcula el contenido armónico y la distorsión armónica total.

También se midió la irradiancia solar que incide sobre el plano del generador fotovoltaico con un piranómetro con una exactitud menor al 5%.

Ambos instrumentos fueron conectados al momento de puesta en servicio del SFCR y mantienen adquisición a la fecha con un período de muestreo igual a 10 minutos.

Por otra parte, el GER ha instalado en el lugar de implantación del SFCR, una estación meteorológica que adquiere datos climáticos empleando el mismo período de muestreo que los otros instrumentos. Este sistema fue

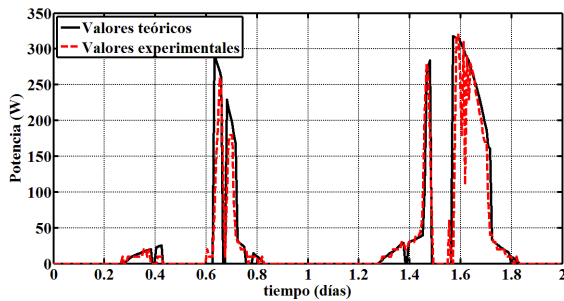
montado a finales del año 2009 y monitorea radiación solar sobre el plano horizontal, velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente, etc.

4. RESULTADOS

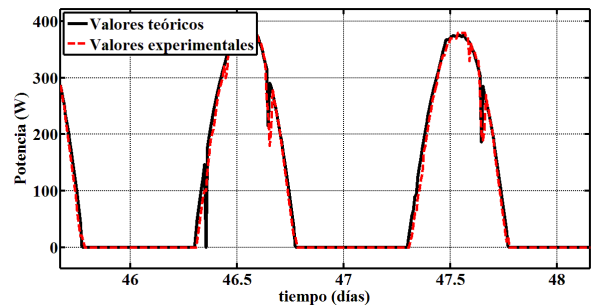
En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos en la simulación del SFCR y se comparan con los datos adquiridos experimentalmente.

La Fig. 2 presenta una comparación entre la evolución temporal de la potencia generada por el SFCR para un período de dos días y la obtenida por simulación durante el mismo período, considerando las mismas condiciones de irradiación, temperatura ambiente, frecuencia y tensión de red. La Fig. 2a presenta estos perfiles para dos días de verano, durante los cuales la temperatura ambiente permaneció entre 22°C y 39°C, y la Fig. 2b lo hace para dos días de otoño donde las variaciones en la temperatura ambiente permanecieron en un intervalo comprendido entre 12°C y 29°C.

En la Fig. 2 se observa que el perfil de potencia obtenido mediante simulación reproduce en forma adecuada el perfil adquirido experimentalmente para las mismas condiciones de operación del SFCR. El desvío cometido al evaluar la energía a partir de los perfiles temporales de potencia simulados respecto de los adquiridos experimentalmente, durante un período de 8 semanas comprendidas entre Febrero y Abril del año 2012, es inferior al 2%. Esta comparación fue hecha a los efectos de validar el modelo desarrollado con el objeto de predecir comportamientos mediante la inclusión de condiciones de operación simuladas.



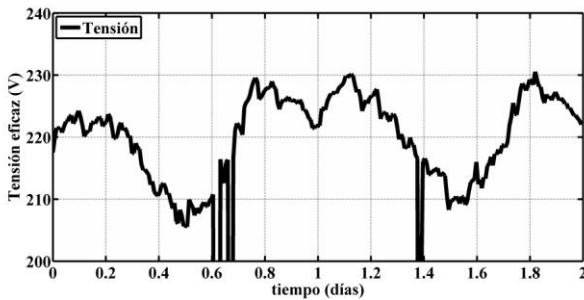
(a)



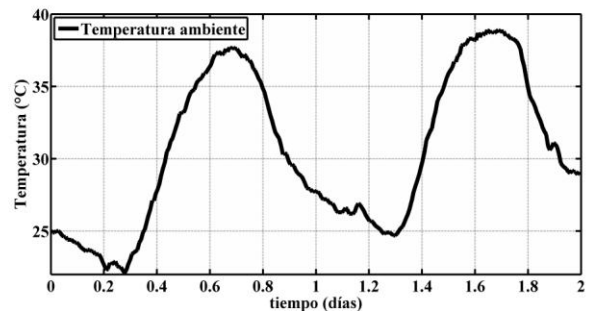
(b)

Figura 2 - Comparación gráfica entre valores experimentales y simulados de la potencia generada por el SFCR para 2 días en verano y otoño. (a) 2 días en verano (22°C – 39°C). (b) 2 días en otoño (12°C – 29°C).

La evolución de la temperatura ambiente y de la tensión para los días de verano se presenta en la Fig. 3 y la evolución de la tensión de red y de la temperatura ambiente para los días de otoño se presenta en la Fig. 4.



(a)



(b)

Figura 3 - Perfiles temporales del valor eficaz de la tensión de red y de la temperatura ambiente para dos días con temperatura ambiente elevada (22°C – 39°C). (a) Perfil de tensión. (b) Perfil de Temperatura ambiente

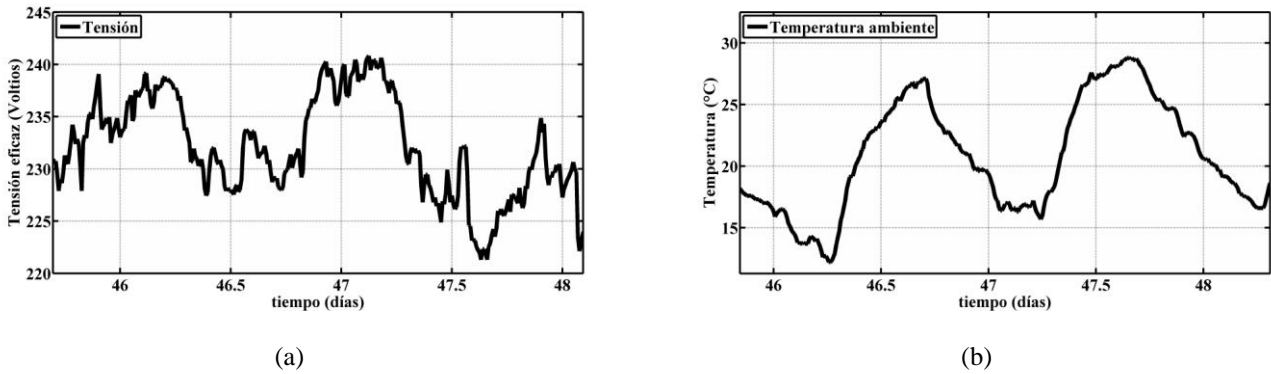


Figura 4 - Perfiles temporales del valor eficaz de la tensión de red y de la temperatura ambiente para dos días con temperatura ambiente baja (12°C – 29°C). (a) Perfil de tensión. (b) Perfil de Temperatura ambiente

Del análisis de las figuras, puede observarse que a medida que la temperatura ambiente aumenta, se produce una disminución en el valor eficaz de la tensión de red. A lo largo de un día, ocurren fluctuaciones en los valores de tensión que permanecen acotadas en un intervalo de aproximadamente 25 V. Cuando la temperatura ambiente aumenta, este intervalo permanece constante y disminuyen los valores extremos (máximos y mínimos) que adopta el perfil temporal de tensión. Este hecho está asociado a que en períodos de elevada temperatura ambiente se encienden gran cantidad de equipos de acondicionamiento térmico ocasionando un aumento en la demanda. Esto ocasiona un aumento en las caídas de tensión que se desarrollan en las impedancias serie asociadas a las líneas de distribución de energía en baja tensión y una disminución en la capacidad de regulación de los transformadores. En algunos casos se produce una sobrecarga tal en la red, que produce la interrupción del servicio. En la Fig. 3a pueden observarse dos interrupciones en el suministro de energía eléctrica ocasionadas por la sobrecarga (asociada a la elevación en la temperatura ambiente). Por otra parte, puede observarse en el perfil de tensión, para días de temperatura ambiente elevada, que los niveles mínimos alcanzados se encuentran por debajo de los límites de trabajo del inversor (210 V), durante este período de tiempo, el SFCR no inyecta a red la energía disponible en el generador FV debido a que actúan las protecciones del inversor desconectando al sistema de la red. Esto ocasiona una disminución en la eficiencia global del SFCR.

Cuando la temperatura ambiente es menor a 30°C, los niveles de tensión se mantienen dentro de los límites de trabajo del inversor sin ocasionar disminución en la capacidad de generación del SFCR, este hecho queda reflejado en el perfil de la potencia generada por el SFCR mostrada en la Fig. 2b.

Considerando suficiente la aproximación que realiza el modelo matemático desarrollado, se realizó una simulación a los efectos de obtener el perfil de potencia disponible en el SFCR y compararla con el perfil de potencia inyectada (Fig. 5). El área bajo estas curvas representa la energía disponible e inyectada a la red. La diferencia entre ambas áreas es la energía que el sistema dejó de inyectar a causa de la variación en los niveles de tensión provocando una disminución en la eficiencia global del sistema. Se pudo constatar que la energía perdida durante los días mostrados en la figura representa un 60% de la energía total que podría haber generado el SFCR.

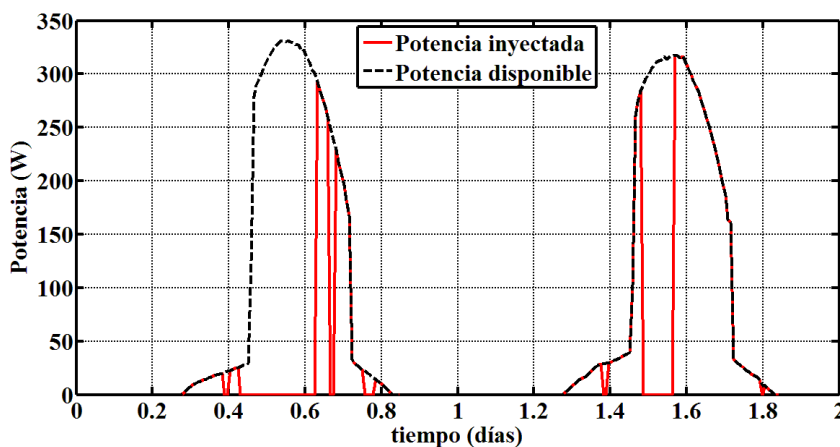
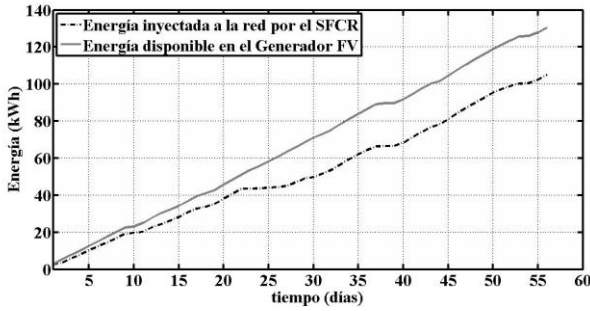
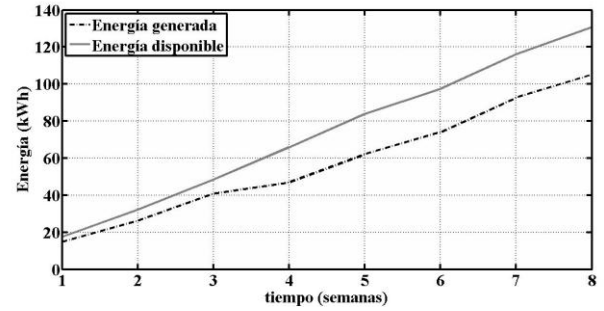


Figura 5 - Energía inyectada y disponible determinada mediante simulación para días con temperatura ambiente mayor a 30 °C.

A los efectos de evaluar la disminución de la capacidad de generación y su correspondiente disminución en la eficiencia global del SFCR, en la Fig. 6a se presenta un gráfico de la energía diaria acumulada obtenida mediante simulación del modelo para un período de 8 semanas (línea de puntos) y la que debería haberse acumulado si el inversor no hubiese desconectado al sistema a causa de las variaciones en los niveles de tensión y frecuencia de la red (línea llena). La Fig. 6b presenta la energía semanal acumulada para ambos casos.



(a)



(b)

Figura 6 - Energía acumulada disponible e inyectada obtenidos para un período de 8 semanas. (a) Evolución diaria. (b) Evolución semanal.

La diferencia en los valores finales de energía acumulada es la que el SFCR no pudo inyectar a causa de inestabilidad en los parámetros de la red de BT durante el período simulado. La energía inyectada a la red durante 8 semanas fue de 105,1 kWh y la disponible alcanzó un valor de 130,6 kWh. La diferencia entre ambas fue de 25,5 kWh, valor que representa una disminución en la eficiencia global del sistema de aproximadamente el 20%.

La Tab. 2 presenta los valores medios mensuales de las variables que caracterizan el funcionamiento del SFCR instalado, calculados a partir de datos obtenidos experimentalmente durante el año 2011. Cabe destacar que durante este año no ocurrió disminución en la eficiencia global del SFCR debido a que los niveles de tensión y frecuencia permanecieron dentro de los requeridos por el inversor. A partir del mes de Febrero del 2012 comenzaron a aumentar las fluctuaciones en los parámetros citados ocasionando una disminución en la eficiencia.

Tabla 2. Valores medios mensuales de los parámetros que caracterizan el funcionamiento del SFCR calculados a partir de datos adquiridos experimentalmente durante el año 2011.

MAGNITUD	ENERGÍA ACTIVA	ENERGÍA REACTIVA	HORAS DE SOL PICO	FACTOR DE POTENCIA	DIST. ARMONICA TOTAL EN CORRIENTE	EFICIENCIA DEL INVERSOR
VALOR MEDIO	55,85 kWh	21,29 kVAr	4,8 h	0,93	8,8 %	89,4 %

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó un modelo matemático simple que permite simular, evaluar y predecir la disminución que existe en la capacidad de generación de un SFCR a causa de variaciones en la amplitud y frecuencia de la señal de tensión de la red. El mismo requiere de perfiles temporales de la radiación solar que incide sobre el arreglo FV, la temperatura ambiente y la amplitud y frecuencia de la tensión en el punto de conexión; valores que pueden ser adquiridos por simulación o mediante medición.

El modelo desarrollado determina las diferencias que existen entre la energía generada por el SFCR y la energía que debería haber inyectado en condiciones óptimas de funcionamiento y de esta manera determina la disminución en la eficiencia global del SFCR.

Esta disminución es ocasionada en la región norte-argentino principalmente por variaciones en los niveles de tensión asociadas a la inclusión de sistemas de climatización en la matriz energética.

Se podría aumentar la eficiencia global del sistema modificando los rangos de trabajo del inversor, de esta forma, el SFCR podría aportar a mejorar las condiciones de la red elevando los niveles de tensión de la misma. Por esta razón, se desprende de este estudio la necesidad de utilizar un inversor para conexión a red que se adapte a las condiciones de trabajo que imponen las redes de BT del norte argentino.

Según valores obtenidos mediante simulación del modelo, el SFCR pierde un 20% de su capacidad de generación por la interacción con la red de BT durante los períodos donde la temperatura ambiente es elevada. Comparando el valor simulado de la energía producida por el SFCR y el valor experimental para el mismo período se determinó que el error relativo cometido no supera el 2%.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del consorcio IRESUD a través de su Director el Dr. Julio Duran para la realización de este artículo, así como al apoyo financiero recibido por parte de la ANPCyT.

REFERENCIAS

- Bello C., Jimenez V., Toranzos V., Busso A., Vera L., Cadena C. (2009), Relevador Portatil de Curvas I-V de Paneles Fotovoltaicos como Herramienta de Diagnóstico *In Situ* de Sistemas de Generación Fotovoltaica, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 13, pp. 77-83, ASADES.*
- Cáceres M., Busso A., Cadena C., Vera L. (2011), Determinación de la Eficiencia de Conversión del Inversor empleado en un Sistema de Generación Fotovoltaica Conectado a Red instalado en el Nordeste Argentino, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 15, pp. 17-24, ASADES.*
- 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, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 14, pp. 25-32, ASADES.*
- Chivelet N, Sánchez J, Lillo S, Fabero F. (2009). Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica. *Serie Ponencias, Editorial CIEMAT. Capítulos 20-23.*
- CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica). (2010). Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina. *pp. 1-13.*
- Durago J. (2011). Photovoltaic Emulator Adaptable to Irradiance, Temperature and Panel-Specific I-V Curves. *Disertación de Maestría, Faculty of California Polytechnic State University, pp. 2-10.*
- Firman A., Toranzos V., Busso A., Cadena C., Vera L. (2011), Determinación del Punto de Trabajo de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red: Método Simplificado de Traslación Punto a Punto a Condiciones Estándar de Medida, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 15, pp. 1-8, ASADES.*
- IEA (International Energy Agency). (2010). PV Power Update. *Newsletter of the IEA PVPS. Vol. 33 pp. 2-8.*
- IEA (International Energy Agency). (2010). Trends in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2009. *Report IEA PVPS T1-19. pp. 3-40.*
- IEC 61724 (1998). Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis.
- Matlab R2010a (2010). <http://www.mathworks.com/>.
- Minplan (Secretaría de Energía, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios). (2009). Generación, Potencia y Combustibles. *Partes 1 y 2 del Informe Estadístico del Sector Eléctrico.*
- Morán F., Facchini M., Doña V. (2010), Impacto de la Generación Fotovoltaica Distribuida en los Niveles de tensión. Aplicación a un Caso Real, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 14, pp. 71-78. ASADES.*
- Morán F., Facchini M., Pontoriero D., Doña V. (2009), Inserción de Generación Distribuida a Través de Instalaciones Fotovoltaicas Domiciliarias Ajustadas a las Curvas Típicas de Demanda Residencial, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 13, pp. 93-99. ASADES.*
- Pietruszko S., Gradzki M. (2003), Performance of a grid connected small PV system in Poland, *Applied Energy, Vol. 74, pp. 177-184.*
- Rampinelli G. (2010), Estudio de Características Eléctricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede, Disertación de Doctorado. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. *pp. 115-127.*
- REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century). (2011). Renewables 2011 Global Status Report. *pp. 5-68.*
- Soracco E. (2008). “Argentina. Matriz Energética Nacional.” *Jornadas Regionales de Ingeniería 2008, Junio de 2008, Oberá Misiones Argentina.*
- U.S. Department of Energy. (2010). “2009 Renewable Energy Data Book”. *Energy Efficiency and Renewable Energy, Agosto de 2010.*
- Vera, L.H. (2004). Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Disertación de Maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Zilles R. (2009). Los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red en Operación en Brasil y Resultados Operacionales de un Sistema. *XVI Simposio de Energía Solar, Noviembre de 2009, Arequipa, Perú.*

GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: STABILITY OF THE PARAMETERS OF THE GRID AND ITS EFFECTS ON THE GENERATION CAPACITY

Abstract. *In order to evaluate the influence that the variation of the characteristic parameters of the low voltage grid has in the overall efficiency of a grid connected PV system (SFCR) a mathematical model to predict the grid-SFCR interaction was developed by the Grupo en Energías renovables (GER). This study presents the development of the mathematical model before mentioned and the methodology used to determine the quality of energy injected by a SFCR. Simulation results and experimental results obtained during 15 months of operation are presented as well. From the analysis of the results it is concluded that the maximum deviation committed by the mathematical model developed is less than 2%, when evaluating the decrease of the generation capacity of the SFCR, the decrease in the overall efficiency of the installed system is 20 % and that to improve this efficiency it is enough to change the working ranges of the inverter*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, SFCR's Inverters, Low voltage network.*