

# SOFTWARE PARA SIMULAR SISTEMAS DE POTENCIA QUE INCORPORAN GENERACION DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA EN BAJA TENSION

Alexis Raúl González Mayans – rmayans@ger-unne.com.ar

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

Luis H. Vera – lvera@ger-unne.com.ar

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

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

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

**Resumen.** Con el objeto de disponer de un programa para simular sistemas de potencia que incorporan generación distribuida fotovoltaica en baja tensión, el Grupo en Energías Renovables (GER) desarrolló un software que permite simular, evaluar y predecir el impacto producido por los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR). En este estudio se presenta por un lado, el desarrollo de los modelos que conforman el programa de simulación y por otro, la metodología empleada para verificar los resultados durante un día representativo. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que, los perfiles simulados de tensión en las barras representan en forma adecuada a los valores obtenidos experimentalmente, por lo tanto, el software puede constituir una herramienta válida para determinar las mejores condiciones de integración de los sistemas fotovoltaicos a la red de baja tensión.

**Palabras clave:** Sistemas Fotovoltaicos, Sistemas de potencia, Baja tensión

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los países que implementan nuevas políticas de diversificación de la matriz energética e inclusión de fuentes de energías renovables se encuentra Argentina, donde en octubre de 2015, se sancionó la Ley Nacional N° 27.191 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica” (modificatoria de la Ley 26.190/2006). Un estudio desarrollado por Garrido et al., (2016) describe los principales cambios introducidos al régimen por esta ley cuya reglamentación tuvo lugar en marzo de 2016. En este contexto, ese mismo año el Ministerio de Energía y Minería de la Nación lanzó el programa RenovAr (CMMESA, 2016), que consiste en la compra de una cierta cuota energética producida a partir de energías renovables sobre la modalidad de llamado a licitación, convirtiéndose en un escenario favorable para la implementación de grandes centrales fotovoltaicas.

Estas políticas y marco apropiado para generación renovable a gran escala, no fue extensivo para el impulso de instalaciones de pequeña potencia como forma de implementar Generación Distribuida (GD) a base de fuentes renovables, en 2016 el estado argentino tuvo que acudir a la incorporación de pequeñas centrales térmicas que utilizan gasoil, en su gran mayoría importado del exterior, como forma de implementar GD para evitar cortes de energía, hoy existe una capacidad de generación de 1.834 MW de este tipo de centrales (Ministerio de Energía y Minería de la Nación, 2016). Este hecho con consecuencias económicas motivó a diferentes actores (empresarios, académicos, políticos), a cambiar el paradigma de la GD. En este contexto, en septiembre de 2017 la Cámara de Diputados de la Nación aprobó un proyecto de ley para autorizar la inyección de energía limpia a la red, denotando el primer paso del estado nacional en la promoción de la GD a nivel usuario del servicio de suministro. De concretarse el proyecto, es de esperar un futuro prometedor para la energía solar fotovoltaica, dado que por su adaptabilidad y por la creciente competitividad en los costos de implementación, se presenta como una fuente renovable con amplia perspectiva de aplicación a la generación distribuida en redes de distribución de baja tensión (BT), pudiéndose prever que alcancen un elevado nivel de penetración (Vinson et al., 2014).

En este aspecto, en el año 2013 el Grupo en Energías Renovables (GER), diseñó e instaló un sistema fotovoltaico conectado a red (SFCR) experimental de 6,72 KWp, con fines de investigación y promoción de la tecnología. Este sistema, emplazado en el acceso al edificio del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (latitud sur 27°27'; longitud oeste 58°49'), viene siendo evaluado y caracterizado desde su puesta en servicio.

Complementariamente a esta evaluación y a efectos, de simular, predecir y evaluar el impacto producido por el SFCR en la red de suministro eléctrico del edificio de Ingeniería, este trabajo presenta el desarrollo de un software para simulación en estado estacionario de sistemas de potencia en BT, empleando modelos matemáticos que tienen en cuenta la interacción SFCR-Red eléctrica. Por otra parte, se presenta una metodología adoptada para adquirir valores experimentales de las tensiones y potencias en los distintos nodos (barras) del sistema a efectos de validar el software desarrollado.

## 2. SOFTWARE PARA EL CALCULO DE FLUJO DE POTENCIA CON INCLUSION DE SFCR

El software desarrollado en lenguaje Matlab (Matlab R2010a), integra el modelo unifilar de la red bajo estudio junto a un modelo matemático de SFCR para obtener los cálculos de flujo de potencia y variables de estado de la red para cada instante de tiempo. En la Fig. 1 se presenta el diagrama en bloques general que contempla las variables de entrada y parámetros de los distintos componentes del programa de simulación, y en la Fig. 2 se muestra la interfaz gráfica de usuario. Los datos de entrada y parámetros de cada modelo se ingresan manualmente a través de planillas de cálculo (tipo Microsoft Excel), respetando un formato específico. El cálculo de flujo de potencia se realiza iterativamente, para determinar los diferentes estados de equilibrio que se dan en distintos instantes de tiempo, a los efectos de obtener las variaciones temporales discretas de las tensiones y ángulos en las barras para un período de tiempo determinado. Para el cálculo de flujos de potencia se utiliza la librería PSAT para Matlab (F.Milano, 2005).

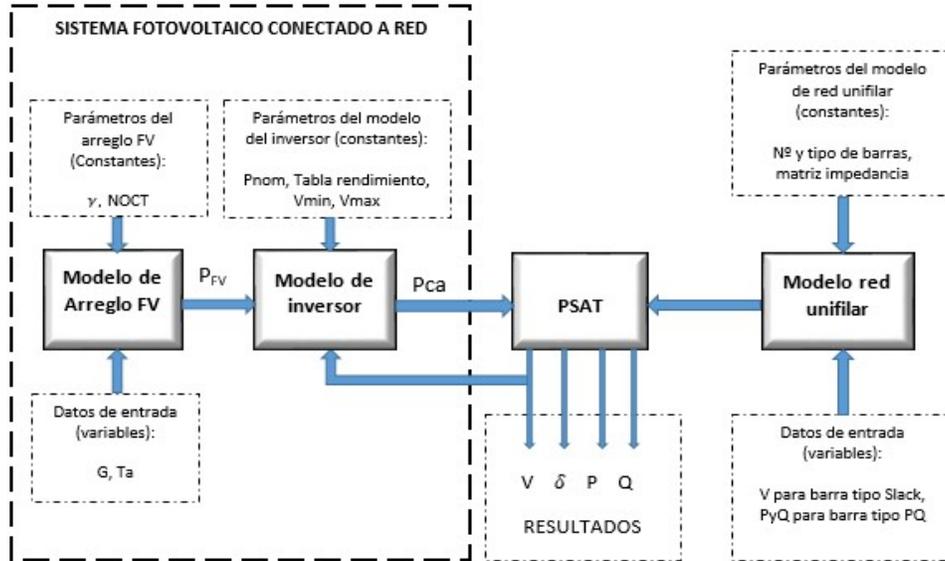


Figura 1- Diagrama en bloques del programa de simulación.

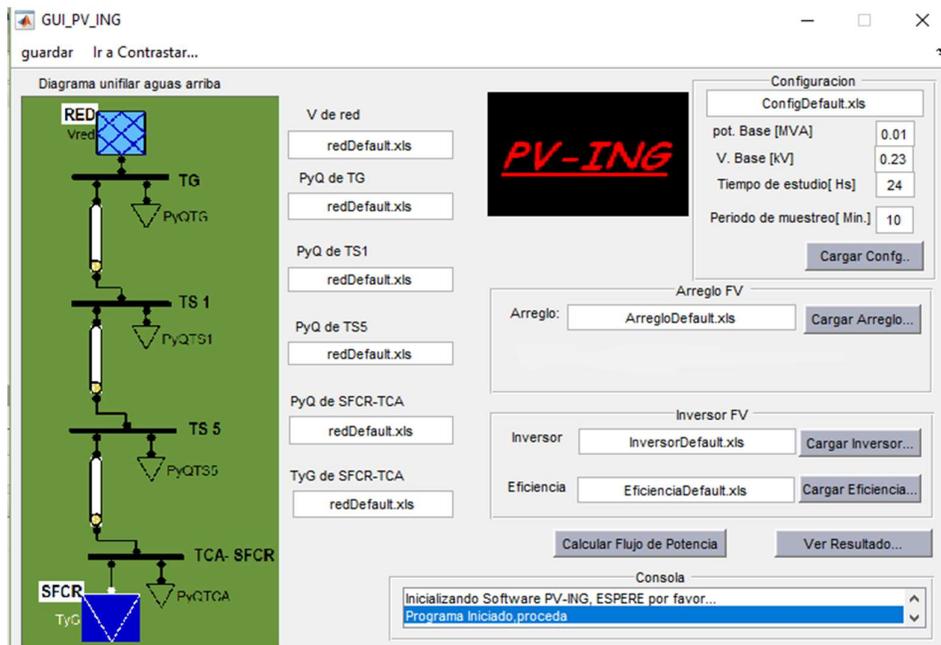


Figura 2- Interfaz gráfica del programa de simulación.

## 2.1 Modelo del sistema fotovoltaico conectado a red

Con el propósito de representar al SFCR como parte del sistema de potencia y poder utilizar los métodos clásicos de simulación (Grainger y Stevenson, 1996), se considera a todo el conjunto fotovoltaico (FV) como un modelo estático de carga negativa (Xiaobo y Fenghai, 2012), para cada instante de tiempo; además, un SFCR se puede dividir en dos subsistemas, el arreglo FV y el inversor para conexión a red.

La Fig. 3 presenta el diagrama unifilar del SFCR conectado al edificio de Ingeniería. Los módulos FV son de silicio policristalino de 240 Wp cada uno

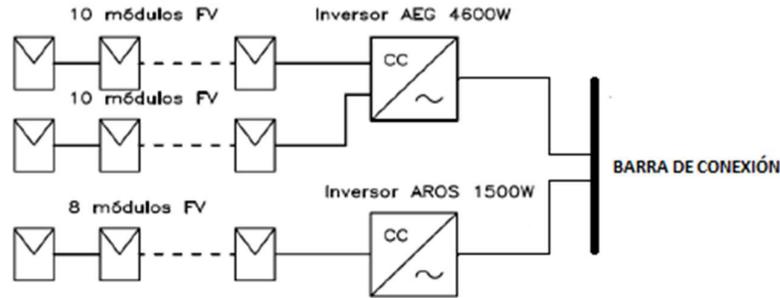


Figura 3- Diagrama unifilar del SFCR conectado al edificio de Ingeniería.

### 2.2.1. Modelo de arreglo FV

Para determinar la potencia de salida del arreglo fotovoltaico como función de la irradiancia y de la temperatura de operación del módulo fotovoltaico, se utiliza el método de Osterwald (Ec.1), el mismo presenta una buena relación entre exactitud y simplicidad (Fuentes et al., 2007).

$$P = P_o \frac{G}{G_o} (1 - \gamma(T_c - T_{c_o})) \quad (1)$$

$P$  es la potencia medida a la irradiancia  $G$  y a la temperatura de celda  $T_c$  y  $\gamma$  es la variación de la potencia con la temperatura en el punto de máxima potencia. El subíndice cero en la ecuación indica valores en condiciones estándar ( $G_o = 1000 \text{ W/m}^2$   $T_{c_o} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En general, los fabricantes de módulos FV presentan el valor de  $\gamma$  en las hojas de datos de sus productos.

A los efectos de simplificar el estudio se utilizó la ecuación presentada por (Vera, 2004) para determinar la temperatura de celda a partir de la temperatura ambiente (Ec. 2). El valor de NOCT también se encuentra presente en las hojas de datos de los módulos FV.

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20^\circ\text{C}}{800} G \quad (2)$$

donde:  $T_a$  = temperatura ambiente;  $NOCT$  = temperatura nominal de operación de la celda.

### 2.1.2. Modelo inversor

Para determinar la potencia inyectada a la red se utilizan las curvas de eficiencia de conversión provistas por el fabricante del inversor, plasmadas como función de la potencia de salida y de la tensión de polarización del arreglo FV. Mediante un relevamiento punto a punto de estas curvas, es posible obtener versiones discretizadas que luego son introducidas al software para su utilización. A partir de este grupo de valores, el modelo permite obtener la potencia inyectada a la red de baja tensión en función de la potencia de salida del arreglo fotovoltaico y de su tensión de polarización. Por otra parte, considera también las protecciones que evitan inyectar energía en condiciones de corte del suministro o por variaciones en los niveles de tensión de la red. Si los valores que adoptan los parámetros de la señal de tensión de la red están fuera de un rango de operación establecido, el inversor interrumpe el suministro de energía.

## 2.2. Modelo red unifilar

El modelo de red unifilar utilizado en el estudio corresponde a una de las fases de la red eléctrica de baja tensión del edificio de ingeniería de la FaCENA - UNNE. Posee dos barras que incluyen generación, los cuales representan a la red equivalente vista desde el tablero general del edificio y al punto de interconexión del generador fotovoltaico Fig. 4.

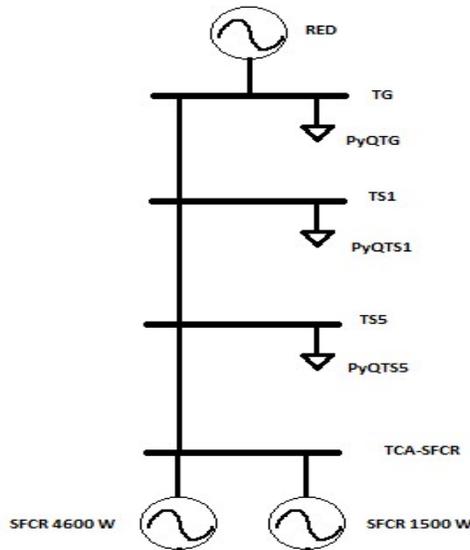


Figura 4- Modelo unifilar de la red bajo estudio.

Para desarrollar el cálculo de flujo de potencia en un determinado sistema eléctrico es necesario establecer en primer lugar dos variables por barra, dando lugar a las posibilidades presentadas en la Tab 1 (Grainger y Stevenson, 1996).

Tabla 1 – Tipos de barras para resolver un sistema de potencia.

Tipo de barra	Se conoce o se especifica	Se debe determinar
PV	$P,  V $	$Q, \delta$
PQ	$P, Q$	$ V , \delta$
SLACK	$ V , \delta$	$P, Q$

En particular, para el estudio en cuestión, se adoptó a la barra TG como el SLACK del sistema, por tener capacidad de entregar y recibir toda la potencia y pérdidas demandadas por la red, las demás barras se adoptan tipo PQ, considerando al SFCR como una carga negativa (inyecta potencia activa hacia la red).

La Tab 2 resume el tipo de barra seleccionada para cada caso, las variables conocidas y las variables a determinar en el sistema eléctrico bajo estudio.

Tabla 2 – Tipos de barras asignadas al sistema eléctrico bajo estudio.

Denominación barra	Tipo de barra	Variables conocidas	Variables a calcular
TG	SLACK	$ V , \delta$	$P, Q$
TS1	PQ	$P, Q$	$ V , \delta$
TS5	PQ	$P, Q$	$ V , \delta$
TCA-SFCR	PQ	$P, Q$	$ V , \delta$

### 3. COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL MODELO MATEMATICO

Para validar el software desarrollado se realizó una caracterización experimental del sistema de potencia bajo estudio, evaluando cada barra mediante analizadores de redes comerciales que poseen una exactitud media del 1% (Metrel MI2292). Los resultados experimentales obtenidos fueron comparados frente a valores teóricos adquiridos mediante simulación del modelo, considerando las mismas condiciones de operación (el modelo matemático fue alimentado con valores adquiridos experimentalmente).

Los instrumentos utilizados permiten medir valor eficaz en tensión y corriente, 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 calculan el contenido armónico y la distorsión armónica total tanto en tensiones como en corrientes. Los analizadores se conectaron a cada barra de la red unifilar mostrada en la fig 4. y permanecieron adquiriendo datos durante 7 días del mes de noviembre.

Por otra parte, se midió la irradiancia solar que incide sobre el plano del generador fotovoltaico con un piranómetro FV marca *Hobo* conectado a un *datalogger* autónomo *Hobo Micro Station*, y la temperatura ambiente con una estación

meteorológica marca DAVIS Vantage pro 2. Ambos instrumentos fueron conectados al momento de puesta en servicio del SFCR y mantienen adquisición de datos a la fecha.

Con la intención de programar el inicio simultaneo del proceso de medición, se sincronizaron los relojes internos de todos los instrumentos y se configuraron para almacenar una medición cada 10 minutos.

De la información adquirida durante 7 días de ensayo, se seleccionaron los datos de irradiancia y temperatura ambiente correspondientes a un día claro, para utilizarlos como datos de entrada en la simulación, Fig. 5. Por otra parte, se asignó a cada barra PQ un perfil de carga y a la barra SLACK un perfil de tensión (también a partir de los datos adquiridos experimentalmente).

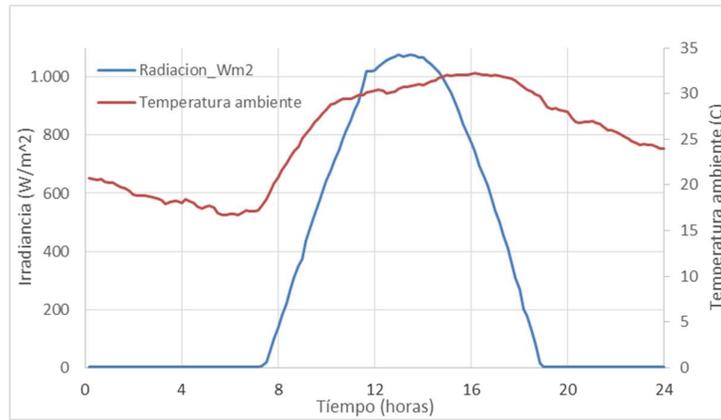


Figura 5- . Irradiancia y temperatura ambiente medidos el día 7/11/2017

Con los resultados de simulación, se calcularon las desviaciones respecto a los valores medidos, para una mejor interpretación del procedimiento se presenta el siguiente diagrama en bloques. Fig. 6.

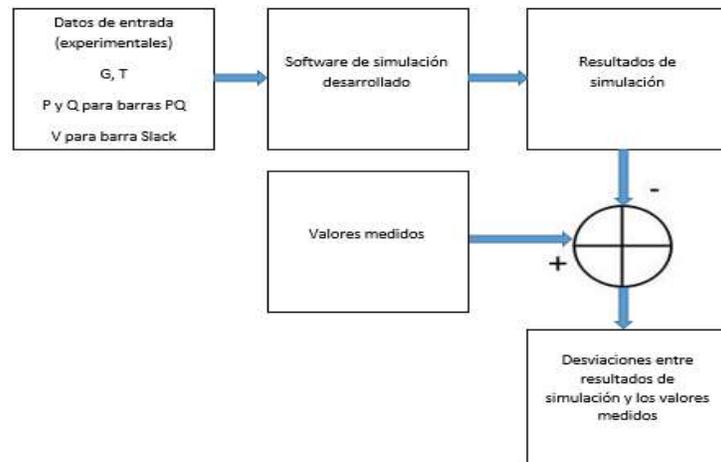


Figura 6- . Diagrama en bloques del procedimiento para determinar las desviaciones

#### 4. RESULTADOS

En primer lugar, se presenta en la Fig. 7 una comparación entre la potencia inyectada por el SFCR para el día 7/11/2017 y la obtenida por simulación durante el mismo periodo, bajo las mismas condiciones de irradiación, temperatura ambiente y tensión de la red. Se observa que el perfil de potencia obtenido mediante simulación reproduce en forma adecuada hasta cerca de las 15 hs al perfil adquirido experimentalmente, en la franja horaria de 15 a 19 hs presenta mayores desviaciones debido a que los arreglos FV se van sombreando durante las horas de la tarde, y el efecto de sombras aún no está contemplado en los modelos desarrollados.

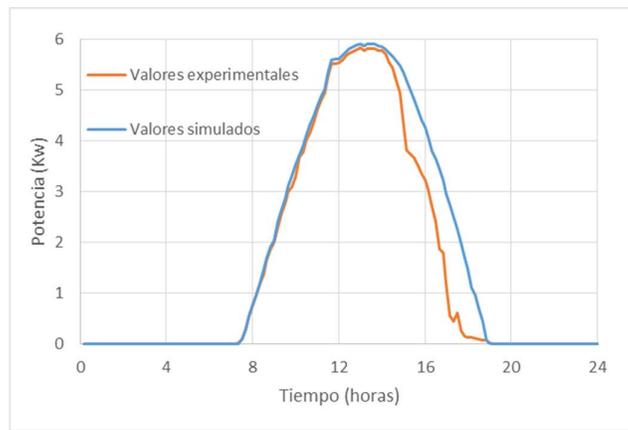


Figura 7- Comparación gráfica de los valores experimentales y simulados de la potencia inyectada a la red.

En segundo lugar, se presenta en la Fig. 8 las comparaciones de la evolución temporal de las tensiones en las distintas barras del sistema, para el día 7/11/2017 y las obtenidas por simulación para el mismo día, considerando las mismas condiciones de carga en las barras.

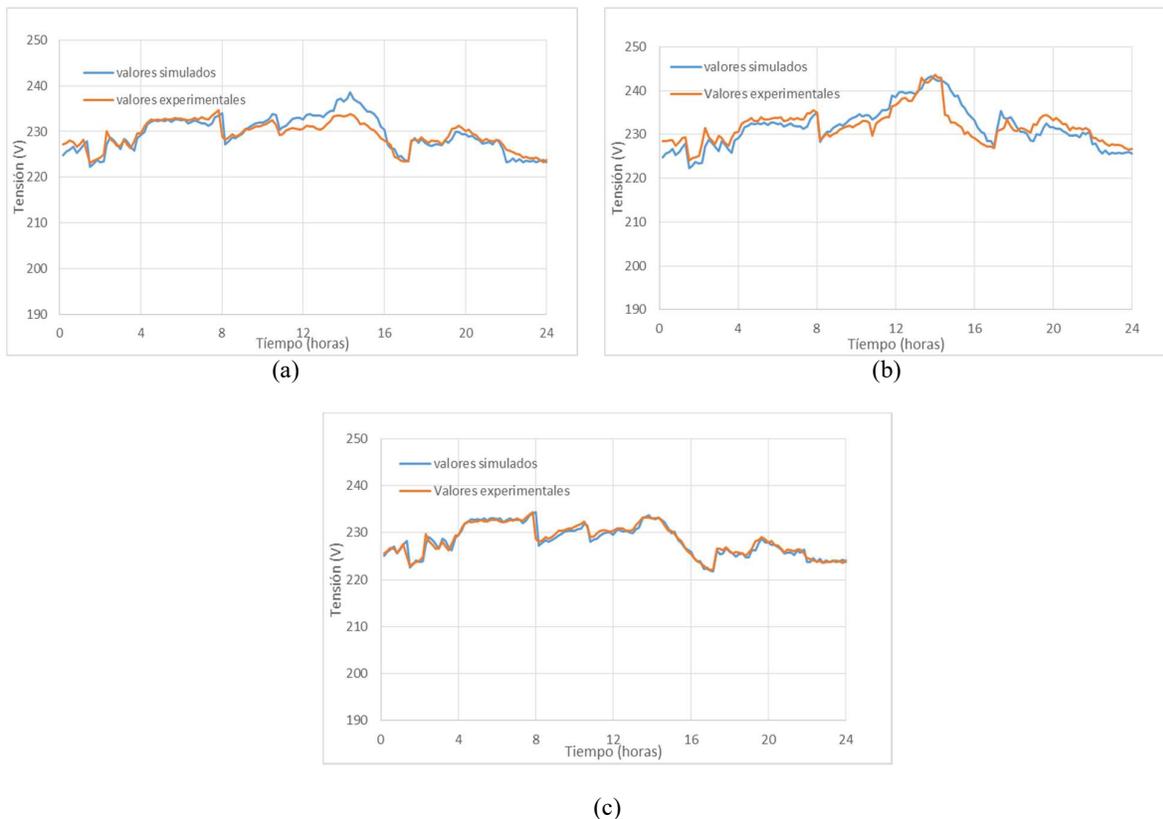


Figura 8- . Comparación gráfica de los perfiles de tensión experimentales y simulados.  
 (a) Perfiles en la barra TCA\_SFCR. (b) Perfiles en la barra TS5. (c) Perfiles en la barra TS1

Del análisis de las figuras, puede observarse que los perfiles de tensión obtenidos como resultados del flujo de potencia de la red modelada, representan en forma adecuada a los perfiles de tensión adquiridos en forma experimental; también se puede apreciar que las desviaciones entre valores medidos y simulados son mayores en las barras que se encuentran próximas al SFCR, eso se debe a que en las barras TG y TS1 la mayor parte de la potencia proviene de la propia red de distribución secundaria del edificio, resultando menor el efecto del SFCR en esas barras, por lo tanto, el efecto no considerado de las sombras tiene mayor influencia en el perfil de tensión de la barra TCA-SFCR.

En la Fig. 9 se presenta la evolución temporal de las desviaciones de los perfiles de tensión medidos y simulados, expresados en porcentaje del valor medido; como es de esperar, la mayor desviación se encuentra en la franja horaria donde se sombrea parte del arreglo FV, llegando a una desviación máxima del 3 % aproximadamente

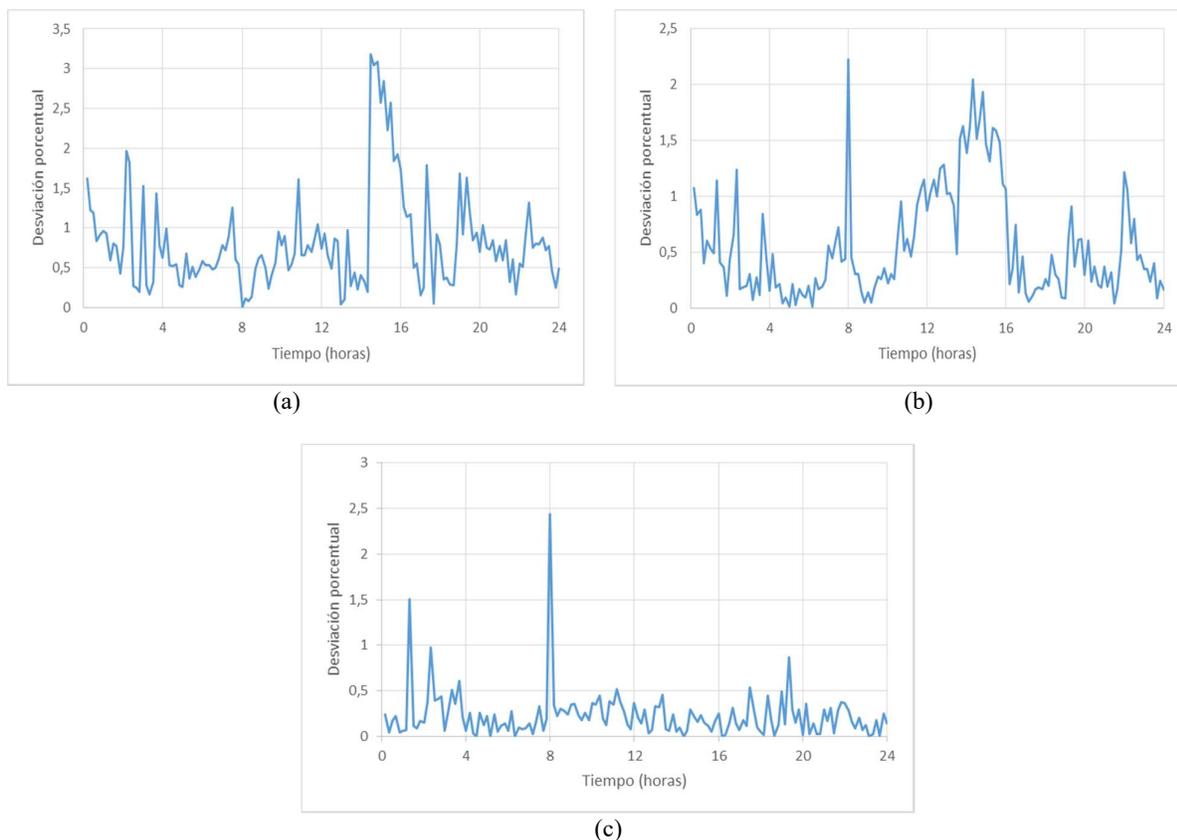


Figura 9- . Errores porcentuales de las tensiones en cada instante de tiempo.  
(a) Barra TCA\_SFRC. (b) Barra TS5. (c) Barra TS1.

#### 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa de simulación de sistemas de potencia en BT que permite simular, evaluar y predecir el impacto producido por el SFRC en la red eléctrica del edificio de Ingeniería. El mismo requiere de perfiles temporales de la radiación solar que incide sobre el arreglo FV, la temperatura ambiente, la amplitud de la tensión en la barra Slack y las cargas en las barras PQ; valores que pueden ser adquiridos por simulación, registros históricos o mediante medición.

Los resultados durante un día claro muestran que los diferentes perfiles obtenidos mediante simulación reproducen en forma adecuada a los perfiles adquiridos experimentalmente, por lo tanto, el software se puede utilizar para determinar las mejores condiciones de integración de los sistemas fotovoltaicos a la red de baja tensión.

Las mayores desviaciones entre valores medidos y simulados se presentan en la barra TCA-SFRC, esta desviación para el día 7/11/2017 presenta un valor máximo de 3 %, y es ocasionada principalmente porque los modelos desarrollados no contemplan el efecto de sombras sobre los módulos FV.

#### REFERENCIAS

- CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista) (2016) “Programa RenovAr. Abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Pliego de bases y condiciones”
- Milano, F. (2005). An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3), 1199-1206.
- Fuentes, M., Nofuentes, G., Aguilera, J., Talavera, D. L., & Castro, M. (2007). Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. *Solar Energy*, 81(11), 1396-1408.
- Garrido, S., Belmonte, S., Franco, J., Díscoli, C., Viegas, G., Martini, I., ... & Schmukler (2016), M. POLÍTICAS PÚBLICAS Y ESTRATEGIAS INSTITUCIONALES PARA EL DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA (2006-2016). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20*, pp 12.33-12.42
- Grainger J, Stevenson W. (2001). Análisis de Sistemas de Potencia. *Editorial Mc Graw Hill*. pp 309-351.
- Matlab R2010a (2010). <http://www.mathworks.com/>.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minería) (2016). Informe Estadístico Annual 2016 del sector energético. pp. 26
- Vera, L.H. (2004). Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Disertación de Maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Vinson, E., Jurado, A., & Gigli, P (2014). Estudio de um sistema de distribución con alta penetración de generación de energía solar. *CIDEL ARGENTINA*

Xiaobo D, Fenghai K. (2012). Study on Load Model of PV Generation Planning. *Energy Procedia*. Vol 17, pp. 119-126.

**Abstract.** *In order to have a program to simulate power systems that incorporate distributed low voltage photovoltaic generation, the Group in Renewable Energies (GER) developed a software that allows simulating, evaluating and predicting the impact produced by photovoltaic systems connected to the grid. (SFCR). This study presents, on the one hand, the development of the models that make up the simulation program and, on the other hand, the methodology used to verify the results during a representative day. From the analysis of the obtained results it is concluded that, the simulated profiles of tension in the bars adequately represent the values obtained experimentally, therefore, the software can be a valid tool to determine the best integration conditions of the photovoltaic systems to the low voltage network.*

**Key words:** *Photovoltaic systems, Power systems, Low voltage.*