

PRIMEROS RESULTADOS DE OPERACIÓN DE UNA PÉRGOLA SOLAR FOTOVOLTAICA INSTALADA EN LA FACENA-UNNE.

P. Cossoli, A. Ibarra, G. Poletto, M. Blanco, M. Cáceres (*)

RESUMEN:

El Grupo en Energías Renovables instaló un sistema fotovoltaico conectado a red (SFCR) en el predio del edificio del Departamento de Ingeniería en el campus Deodoro Roca. El mismo se encuentra acoplado arquitectónicamente al camino de ingreso mediante una estructura tipo pérgola. El sistema posee una capacidad de generación de 6720 Wp y cuenta con un total de 28 módulos fotovoltaicos (FV) de 240 Wp cada uno. Los primeros resultados, obtenidos para un día claro en época invernal, muestran un total de 40 kWh de energía diaria disponible en caso de estar los generadores orientados en la dirección e inclinación óptima. Debido al acoplamiento arquitectónico solo están disponibles 32,25 kWh de los cuales, por efectos de sombras sobre los generadores, solo 28,52 kWh son inyectados a la red de baja tensión del edificio. En consecuencia, teniendo en cuenta la energía total disponible, la capacidad de generación del SFCR instalado se ve disminuida en un 28,7 %, de los cuales 19,5 % se debe a la orientación e inclinación del generador FV y 9,2 % a la proyección de sombras por parte del edificio adyacente.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos conectado a red, Paneles solares, Acoplamiento arquitectónico

ABSTRACT:

The Renewable Energy Group installed a grid connected photovoltaic system (SFCR) in the building of the Department of Engineering at the Deodoro Roca campus. The same is coupled architecturally by a pergola type structure. The system has a generating capacity of 6720 Wp and has a total of 28 photovoltaic (PV) modules of 240 Wp each. Preliminary results, obtained for a clear day in winter time, show a total of 40 kWh of energy available if the generators were oriented in the optimal direction and inclination. Due to architectural coupled are available only 32.25 kWh, for shadow effects on the generators, just 28.52 kWh are injected to the low voltage grid of the building. Consequently, taking into account the total energy available, the generation capacity is decreased a 28.7%, of which 19.5% is due to the orientation and inclination of the PV generator and 9.2% to the projection of shadows from the adjacent building.

Keywords: Grid connected photovoltaic systems, solar panels, architectural coupling

(*)GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE. Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.
Tel/Fax: (0379) 4473931 e-mail: pcossoli@ger-unne.com.ar

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red (SFCR) y su inclusión en la matriz eléctrica como sistemas de generación distribuida (GD) son actual objeto de investigación a nivel mundial. Esta tecnología de generación ha tenido amplio desarrollo y gran penetración en países de la unión europea como Alemania, España e Italia y más recientemente en el continente Asiático, en particular China y Japón. Alemania por ejemplo, ha logrado la mayor capacidad de potencia instalada en el mundo con un total de 35,5 GWp y China superó el record mundial de crecimiento anual de esta tecnología instalando una capacidad de 11,3 GWp solo en el año 2013. (IEA PVPS, 2013) (IEA PVPS, 2014). En Latinoamérica en cambio, el proceso de incorporación de sistemas FV a la matriz energética está en sus albores, con una marcada tendencia hacia la instalación de grandes centrales de generación. En Chile, en Mayo de 2014, entró en operación la planta fotovoltaica “Amanecer Solar Cap” de 100 MWp; el gobierno de Brasil por su parte, ha abierto una subasta para contratar 867 MWp de generación FV (Krenzinger, 2012) y, en Argentina, en el marco de la ley Nacional N° 26.190 (2006), se han acoplado a red aproximadamente 8 MWp fotovoltaicos (CAMMESA, 2013). Esta capacidad de generación fue instalada en el marco del programa GENREN que pretende estimular la incorporación de sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Los objetivos planteados en el programa GENREN impulsan la instalación de grandes centrales de generación, sin embargo surgen ventajas de implementar GD con SFCR en entornos urbanos. Los generadores fotovoltaicos pueden ser integrados arquitectónicamente a edificios ya existentes

(Chivelet et al, 2009) y, durante los períodos de generación, estos sistemas pueden alimentar parte de la carga del propio edificio en el que se instalan e inyectar a la red de distribución el excedente de energía generada. Esta forma de implementar SFCR permite mejorar significativamente la calidad de energía en aquellas redes que se encuentran sobrecargadas por el aumento en el consumo y que han sido dimensionadas sin considerar la creciente demanda de energía eléctrica (CNEA, 2010, CAMMESA, 2014). Por lo tanto, el uso de SFCR de esta manera, limita la necesidad de realizar grandes obras civiles para redimensionar la red de BT existente. En particular, en el nordeste argentino, uno de los picos de consumo de energía eléctrica durante el día coincide con el período de máxima irradiancia solar (Melano y Pinto, 2010). De esta forma, la utilización de sistemas fotovoltaicos permite allanar dichos picos de demanda, aliviando los transformadores y líneas de transmisión durante los períodos de generación de SFCR.

En este aspecto, para un adecuado desarrollo de la tecnología en las distintas regiones de la Argentina y para una correcta planificación de su inclusión en la matriz de generación, resulta necesario realizar estudios sistemáticos para delimitar el impacto que tiene la conexión de SFCR sobre la red de distribución a la cual se conectan (Denholm y Margolis, 2007). A partir de modelos matemáticos adecuados es posible determinar variaciones en los parámetros de operación del sistema eléctrico ocasionados por la interacción de esta última con los SFCR acoplados y delimitar la cantidad de generación FV que puede ser introducida sin que esto influya en la calidad en el servicio de suministro de energía eléctrica (Cáceres, 2014). Para lograr esto, es necesario en primer lugar realizar una correcta ca-

racterización de la tecnología de generación a partir de análisis de las características de operación de SFCR experimentales instalados en diferentes latitudes.

Este hecho motivó el desarrollo de un proyecto de investigación nacional cuyo objetivo es evaluar la incorporación de SFCR como GD en entornos urbanos de la Argentina (IRESUD, 2011). En el marco de este proyecto, el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE, diseñó e instaló una pérgola solar fotovoltaica experimental que genera e inyecta energía eléctrica a la red de distribución de baja tensión (BT) del edificio del Departamento de Ingeniería en el campus Deodoro Roca, con una potencia nominal de 6720 Wp. En este trabajo se presentan las características técnicas del sistema instalado y un análisis de cómo influyen las condiciones de operación de un generador fotovoltaico que ha sido acoplado arquitectónicamente a un edificio existente en la capacidad de generación del SFCR.

SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED

Los SFCR generan energía solo en los instantes en los que la radiación solar incide sobre ellos, por lo tanto, toda la energía captada es inyectada directamente a la red eléctrica a la cual se conectan. Esta característica de intermitencia tiene la ventaja de no precisar mecanismos de almacenamiento de energía (baterías). Al no poseer bancos de baterías el sistema se torna más económico y las obras necesarias para su instalación son más simples. Además se obtiene un aumento en la confiabilidad del sistema y se reducen las necesidades de mantenimiento.

En un SFCR podemos distinguir los si-

guientes componentes:

- Generador fotovoltaico (FV), constituido por un arreglo de módulos FV (denominados strings), acoplados eléctricamente de manera conveniente para obtener los valores de tensión y corriente deseados.

- Inversor para conexión a red, el cual convierte la corriente continua (CC) que proporcionan los módulos en corriente alterna (CA) que será inyectada a la red eléctrica. Este dispositivo se encarga también de polarizar a los módulos en su punto óptimo para aprovechar al máximo la energía solar disponible. Cuenta además, con sistemas de control y seguridad, los cuales monitorean constantemente la frecuencia y tensión de red para desconectarse de la misma en caso de que esos valores estén fuera de los límites permitidos, evitando de esta manera la generación en islas.

- Tablero de CC y CA, en el cual se instalan todos los elementos de protección, tales como interruptores, descargadores gaseosos e instrumentos para medición de energía.

La cantidad de energía aportada por el SFCR depende de la irradiancia que incide sobre los generadores, es por eso que la orientación e inclinación de los mismos es de suma importancia en este tipo de sistemas. Para el hemisferio Sur, la orientación adecuada para maximizar la captación de energía es hacia el Norte. Por otra parte, la inclinación se determina en función de la posición geográfica del sistema y de la época del año en la cual se quiera maximizar la captación de energía. Con un ángulo de inclinación cercano al plano horizontal se captará mayor radiación en verano, en cambio, aumentándolo se favorecerá la captación de energía en invierno. Para obtener irradiancia constante a lo largo del año se

adopta el valor de latitud del lugar para la inclinación de los generadores. En el caso particular de la Ciudad de Corrientes, el ángulo óptimo de inclinación es de 27° .

Sin embargo, cuando el objetivo es acoplar arquitectónicamente los SFCR a estructuras ya existentes, la orientación e inclinación óptima de los generadores no siempre puede ser obtenida. Por otro lado, la proyección de sombras sobre

arquitectónicamente mediante una estructura tipo pérgola de 16 m de longitud, la cual se encuentra emplazada en el camino que da acceso al edificio. En la Figura 1 se puede apreciar la ubicación geográfica de la pérgola y su emplazamiento respecto al edificio lindante.

La Figura 2 presenta un diagrama unifilar del sistema instalado. Con una cantidad total de 28 módulos FV marca Sunmodule

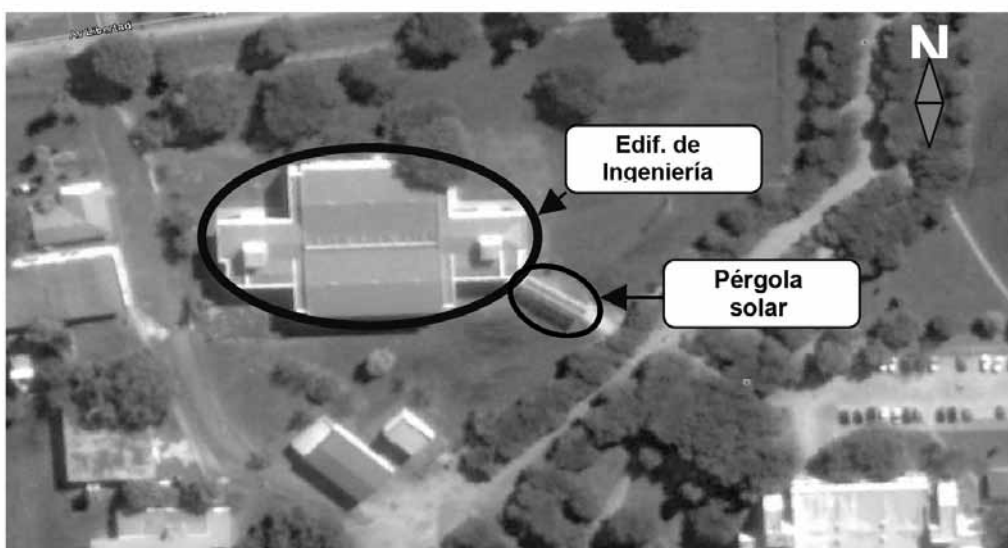


Figura 1 – Ubicación geográfica de la pérgola solar instalada

los generadores disminuye la cantidad de energía disponible para ser inyectada a la red. Entonces, resulta conveniente realizar una evaluación de las pérdidas de energía a la hora de proyectar un acoplamiento arquitectónico de SFCR.

ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA INSTALADO

El SFCR que se proyectó e instaló en el edificio del Departamento de Ingeniería en el campus Deodoro Roca es bifásico y cuenta con una capacidad de generación de 6720 Wp, divididos en dos generadores FV, uno de 4800 Wp y otro de 1920 Wp. Los generadores FV se encuentran integrados

de 240 Wp, el SFCR esta a su vez constituido por dos subsistemas monofásicos que denominaremos Sistema Fase R (SFR) y Sistema Fase S (SFS). El sistema SFR posee dos cadenas de 10 módulos cada uno, conectados en serie. El sistema SFS por su parte, posee un generador FV constituido por una única cadena de 8 módulos, conectados eléctricamente en serie. Cada uno de los módulos que constituyen los arreglos se encuentran anclados y distribuidos a la estructura de la pérgola de forma tal que proporcionan una vista agradable al público que transita.

Cada uno de los subsistemas menciona-

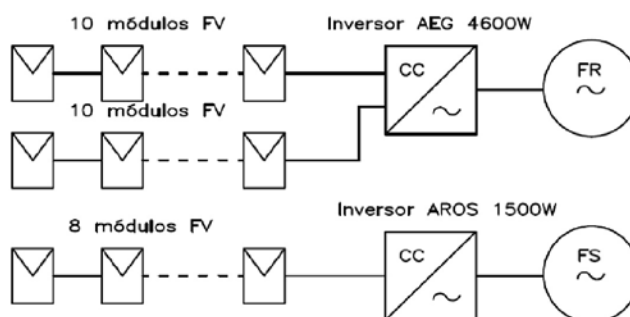


Figura 2 – Diseño esquemático del SFCR bifásico

dos posee su correspondiente inversor para conexión a red. Los tableros de CC y CA se encuentran instalados en una de las oficinas del Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos del GER, en el ala Sur del edificio. Por otra parte los conductores de acometida que van desde los generadores hacia el tablero de CC están dispuestos en ductos subterráneos y cuentan con cámaras de inspección estancas para realizar mantenimiento.

COMPONENTES PRINCIPALES

Módulos FV

Los módulos FV utilizados corresponden al modelo SW240Poly, de la marca Sunmodule, los mismos son de silicio policristalino con una potencia máxima de 240 Wp. Sus características se listan en la Tabla 1.

Módulos FV (Datos de Catálogo)					
Marca y Modelo	Potencia máxima (Wp)	Tensión de circuito abierto (V)	Tensión de máxima potencia (V)	Corriente de corto circuito (A)	Corriente de máxima potencia (A)
Sunmodule SW240 Poly	240	37,2	30,2	8,44	7,96

Tabla 1. Parámetros eléctricos de los módulos FV utilizados en el generador

Las diferentes cadenas han sido configuradas empleando para su conexión los propios cables y terminales provistos de fábrica.

Inversores

Para convertir la energía generada por los módulos FV e inyectarla a la red eléctrica se utilizaron inversores de uso solar, de dos marcas diferentes.

Por un lado, el sistema SFS utiliza un inversor de la marca Aros, modelo Aros1500, el mismo es monofásico y posee una potencia nominal de 1500 W. El sistema SFR, por su parte, utiliza un inversor de la marca AEG, modelo Protect PV 4600, con una potencia máxima de 4600 W, el mismo posee tres sistemas de seguimiento de punto de máxima potencia, lo cual le permite polarizar de manera independiente cada uno de las cadenas conectadas al inversor, maximizando la energía inyectada.

La Figura 3 muestra los inversores que

se encuentran instalados en las oficinas del Laboratorio de Sistemas Fotovoltaico del GER en el edificio del Departamento de Ingeniería. Anclados a la pared y espaciados convenientemente no precisan de ningún sistema adicional de refrigeración.



Figura 3 – Instalación de tableros de maniobras e inversores.

ESTRUCTURA DE SOPORTE DE LOS GENERADORES FV

La estructura de soporte está emplazada sobre el camino de acceso al edificio del Departamento de Ingeniería. La misma consiste en cinco arcos trapezoidales realizados en hierro estructural. Sobre ellos, de forma transversal a los arcos se encuentran cuatro correas de perfil tipo “C” sobre las cuales se anclan los módulos FV.

La Figura 4 muestra la estructura de soporte junto con los módulos FV instalados. También se puede apreciar como están distribuidos los diferentes arreglos para cada uno de los sistemas. Del lado derecho de la imagen también puede apreciarse el propio edificio de Ingeniería.

Con el objetivo de acoplar arquitectónicamente la pérgola solar al predio del edificio de Ingeniería, la misma se instaló



Figura 4 – Distribución de las diferentes cadenas en la estructura de soporte.

Cada uno de los arcos se encuentran equidistante entre si y las columnas de soporte tienen una altura de 3,5 m en un extremo y 2,5 m en el otro, de esta forma se logra una inclinación de 12° para los arreglos de módulos.

sobre el camino que da acceso al edificio, quedando así con una orientación de los generadores en dirección NE. Por lo tanto, al no estar orientados en la dirección óptima, es de esperar entonces una reducción en la cantidad de energía producida e inyectada por el sistema.

Por otro lado, como también se deseaba proporcionar cobertura al camino, los generadores debieron instalarse con una inclinación diferente de la óptima. Dado que, una inclinación igual a 27° reduciría demasiado la cobertura sobre el camino y un ángulo nulo desaprovecharía la radiación solar durante el invierno, se optó por inclinar los generadores a 12° . Si bien la cantidad de energía inyectada se ve disminuida, con ese ángulo se obtiene una disposición agradable a la vista.

Además de la influencia de la orientación e inclinación de los módulos se presenta otro inconveniente. Debido a la cercanía del edificio con la pérgola solar, el mismo produce un sombreado de los módulos a lo largo de las horas de la tarde. Por tal motivo, la disposición de los diferentes arreglos ha sido tal que la desconexión por efectos de sombreado se produce de manera escalonada. La cadena 1/SFS, que se encuentra más cerca del edificio, es el primero en desconectarse de la red ya que es el primero que empieza a ser sombreado. Luego, se desconecta la cadena 2/SFR y por último la cadena 3/SFR en el extremo opuesto al edificio, los cuales corresponden al sistema SFR de mayor potencia.

MEDICIÓN DE VARIABLES DE DESEMPEÑO

Todos los efectos mencionados anteriormente contribuyen a la disminución de la energía inyectada respecto de la energía solar total disponible. Con el objetivo de caracterizar el SFCR y determinar la cantidad de energía que no es inyectada a la red, se instaló un sistema de monitoreo de variables tanto meteorológicas como eléctricas.

Para determinar cuanta energía pueden inyectar los generadores a la red en preciso conocer la irradiancia sobre los mismos, para ello se utilizó un solarímetro de tipo fotovoltaico marca Hobo, el cual se encuentra instalado solidario con la estructura de módulos FV. El mismo adquiere un valor cada diez minutos y los almacena en su memoria interna.

Por otro lado, para conocer la cantidad de energía inyectada a la red y evaluar la eficiencia del sistema, se utilizaron los datos provistos por los inversores, ya que los mismo cuentan con un sistema interno de monitoreo de variables eléctricas y un software que permite su almacenamiento en PC.

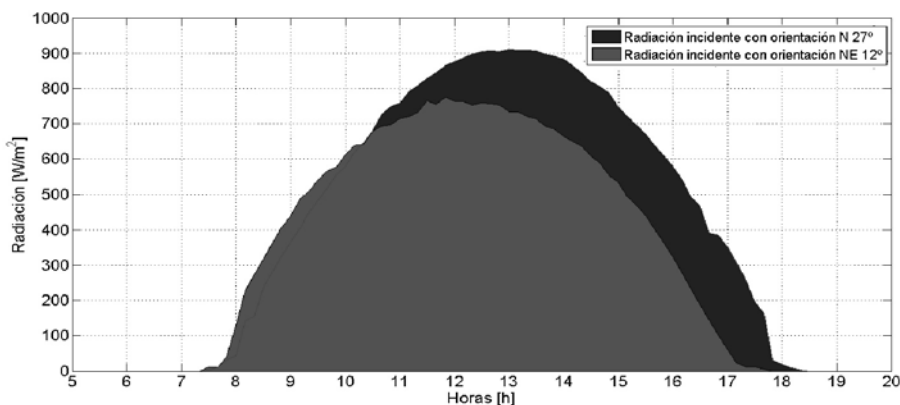


Figura 5 – Radiación solar a lo largo de un día de invierno para dos orientaciones diferentes

RESULTADOS

La Figura 5 presenta la variación de la radiación solar a lo largo de un día claro del mes de Julio, para dos orientaciones diferentes. El área bajo la curva azul representa la radiación que incidiría sobre los generadores si los mismos estuvieran orientados al N y con una inclinación de 27°. El área roja, en cambio, corresponde a la radiación que realmente incide sobre los módulos, estando los mismos orientados en dirección NE y con una inclinación de 12° y sin sombreamiento.

Se observa que la orientación NE favorece la captación de energía durante las primeras horas de la mañana, mientras que la orientación N tiene una distribución simétrica de la energía incidente alrededor del pico máximo que se produce al medio día solar. El instante de tiempo donde ocurren los picos de máxima radiación se encuentran desfasados, también debido a la diferencia de orientación. Por su parte, la amplitud de la curva correspondiente a la inclinación de 12° es menor, dado que los datos fueron obtenidos para un día de invierno.

La Figura 6 presenta la variación de la

potencia inyectada a la red durante el día. El área de la curva de color rojo indica la energía total disponible cuando los generadores se encuentran orientados al N con 27° de inclinación, resultando un total de 40 kWh, en contraste, el área de la curva en color azul representa la energía disponible cuando los generadores se orientan al NE con una inclinación de 12°, donde se obtiene un total de 32,25 kWh de energía disponible.

En condiciones reales de funcionamiento, los arreglos FV se van sombreando durante las horas de la tarde, por lo tanto, la energía total inyectada por el sistema a la red de BT del edificio resulta igual a 28,52 kWh, un 71,3 % de la energía total disponible, y se encuentra representado por el área bajo la curva de color negro en la Figura 6. Los puntos de inflexión marcados con un círculo rojo indican los instantes en los cuales se producen las desconexiones de las diferentes cadenas.

Por último, las áreas sombreadas en escalas de grises representan la energía inyectada por cada una de los sistemas, 6,76 kWh y 21,76 kWh para los sistemas SFR y SFS, respectivamente.

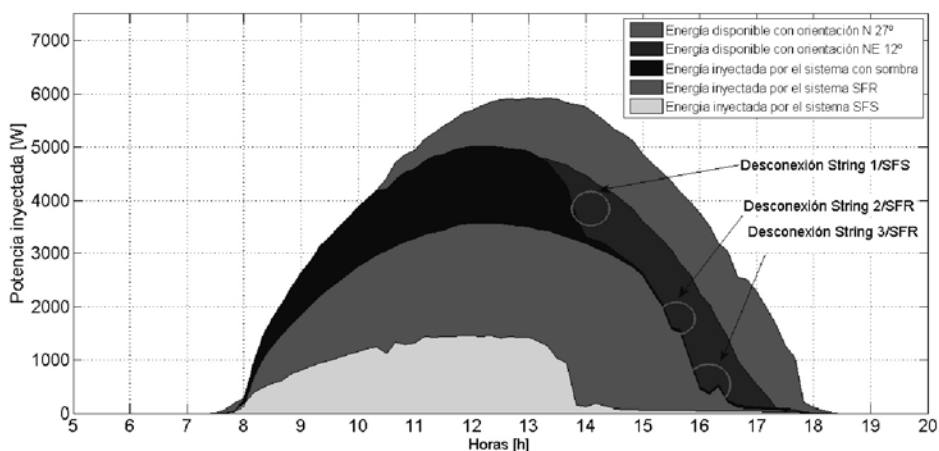


Figura 6 – Variación diaria de la potencia disponible en diferentes condiciones.

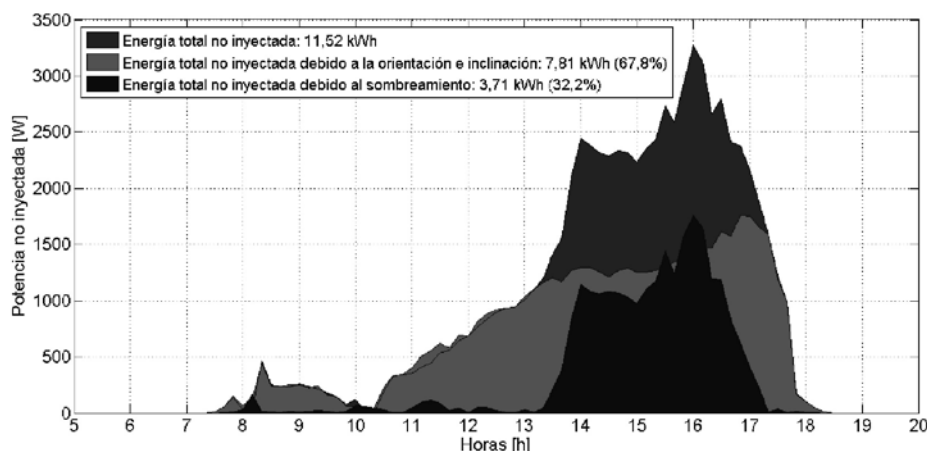


Figura 7 – Variación de la energía no inyectada a lo largo del día en diferentes condiciones de inclinación y orientación

La figura 7 muestra la cantidad de energía que se pierde de ser inyectada a la red en los diferentes casos. El área bajo la curva azul representa la energía total desaprovechada, con un valor de 11,52 kWh. En cambio, el área bajo la curva roja indica la energía que se desaprovecha al orientar los generadores en una dirección diferente de la dirección N, y resulta un total de 7,81 kWh, es decir un 67,8 % de las pérdidas se debe al efecto de la orientación e inclinación de los generadores. Por último, el área en color negro, con un valor de 3,71 kWh representa la energía desaprovechada por el sistema debido a los efectos de sombreado, siendo un 32,3% respecto de la energía total desaprovechada. De esta manera queda claro que, para este caso en particular, el principal factor que influye en la eficiencia global del sistema debido al acoplamiento arquitectónico es la orientación e inclinación de las cadenas.

CONCLUSIONES

Se instaló un SFCR bifásico de 6720 W, acoplado arquitectónicamente al camino de acceso al edificio del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales en el campus Deodoro Roca de la UNNE. Este sistema será utilizado

como objeto de estudio para evaluar el impacto ocasionado en la red BT por el acoplamiento de SFCR en el marco de un proyecto nacional para estudiar incorporación de GD con esta tecnología.

Se obtuvieron los primeros resultados de desempeño del sistema, pudiéndose caracterizar los principales factores que afectan el rendimiento global del mismo. Debido al acoplamiento arquitectónico de los generadores fotovoltaicos, la capacidad de generación del SFCR instalado disminuye un 28,7 % de los cuales aproximadamente 19,5 % se debe a la orientación e inclinación del generador FV y 9,2 % a la proyección de sombras por parte del edificio aledaño.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina, por proporcionar ayuda financiera prestada al proyecto de investigación: PICT 0300/2008. Los autores también desean agradecer el apoyo económico del Ministerio de Ciencia y Técnica a través del proyecto de investigación FONARSEC FITS - Energía 008/2010 (Consortio público - privado IRESUD).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cáceres M. (2014). Influencia de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red de Distribución dentro del Panorama Energético Local. Tesis doctoral Universidad Nacional de Salta, pp 11-20.
- CAMMESA. (2013). Informe anual 2014 Mercado Eléctrico Mayorista.
- 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.
- Denholm P, Margolis R. (2007). Evaluating the Limits of Solar Photovoltaics (PV) in Traditional Electric Power Systems. *Energy Policy*, Vol 35, pp. 2852-2861.
- IEA-PVPS. (2013). Annual Report 2013. Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems, pp 7-29.
- IEA-PVPS. (2014). PVPS Report: Snapshot of global PV 1992-2013, Report IEA PVPS T1-24:2014, pp 5-12.
- IRESUD (2011) Convenio Asociativo Público Privado para desarrollar el proyecto: Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos.
- Krenzinger, A. (2012) Mercado y Políticas Públicas de la Energías Solar Fotovoltaica en Brasil. Presentación Oral en misión de trabajo en el marco del Programa de Cooperación Internacional CAPES-MINCYT.
- Martín Caamaño E. (2009). Generación de Energía en Sistemas Fotovoltaicos conectados a la Red. Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica. Serie Ponencias, Capítulo 19, Editorial CIEMAT.
- Melano E., Pinto E. (2010). Análisis de Alternativas Para el Abastecimiento Eléctrico a la Ciudad de Corrientes. Corrientes Argentina: Congreso Nacional de Ingeniería.