

ENSAYO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS

D. Raggio, H. Socolovsky, J. Fernández Vázquez, O. Romanelli

Departamento Energía Solar (DES) - Gerencia de Investigación y Aplicaciones
Centro Atómico Constituyentes (CAC)
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina
Tel. (011) 6772-7619, Fax (011) 6772-7121, e-mail: raggio@tandar.cnea.gov.ar

Recibido 16/09/15, aceptado 14/10/15

RESUMEN: El presente trabajo muestra las primeras mediciones de inversores fotovoltaicos para conexión a red utilizando un sistema automatizado de ensayo de inversores. Se comparan determinadas características como el factor de potencia, la distorsión armónica y la inyección de corriente continua de equipos comerciales de 1500W, 2800W y 4600W respectivamente. Se presentan además los resultados de un ensayo realizado para estudiar el funcionamiento “anti-isla”, utilizando un circuito de carga RLC paralelo sintonizado a la frecuencia de la red. La adquisición de este equipo permite al DES seguir avanzando en el análisis de este tipo de sistemas.

Palabras clave: energía solar, inversor fotovoltaico

INTRODUCCIÓN

El proyecto “Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos”, parcialmente subsidiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Proyecto FITS N° 0008/2010) fue ejecutado desde fines de 2011 hasta abril de 2015. El objetivo principal del citado proyecto era introducir en el país tecnologías asociadas con la interconexión a la red eléctrica, en áreas urbanas y periurbanas, de sistemas solares fotovoltaicos (FV) distribuidos, contemplando para ello cuestiones técnicas, económicas, legales y regulatorias. Para su ejecución, se creó el Convenio Asociativo Público-Privado IRESUD conformado por dos organismos públicos, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), y 5 empresas privadas: Aldar S.A., Edenor S.A., Eurotec S.R.L., Q-Max S.R.L. y Tyco S.A.. Contó con el apoyo del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), la Secretaría de Energía de la Nación (SE), y otros organismos vinculados al sector de energía de diversas provincias. Participaron también numerosas Universidades Nacionales de diferentes ciudades del país.

Uno de los objetivos del proyecto IRESUD fue el de instalar sistemas FV piloto conectados a red en los organismos públicos y privados involucrados, con el fin de estudiar el funcionamiento de los mismos ante diferentes condiciones de operación. Un tema relevante en relación con el funcionamiento de estos sistemas es la posible perturbación de la red eléctrica debido a la inyección de energía por parte de los inversores de tensión.

Para analizar el funcionamiento de los inversores para conexión a red utilizados en el proyecto se adquirió un sistema automatizado de ensayos de inversores FV que permite, entre otras cosas, simular los paneles solares y las características eléctricas de la red sobre la cual se inyecta energía mediante fuentes de tensión programables. Este sistema permite realizar ensayos simulando distintas condiciones de trabajo, tanto del lado del sistema FV como del lado de la red de 220V.

Por otro lado, uno de los puntos más importantes en torno a la seguridad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red pública de baja tensión es su desconexión automática de la red cuando ésta última no está presente. Desde el punto de vista normativo esto está contemplado en la norma alemana

VDE0126-1-1. Para verificar el cumplimiento de este requerimiento de seguridad, se implementó un circuito de ensayo a fin de verificar el tiempo de desconexión en condiciones eléctricas particulares.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El sistema de ensayo automatizado Chroma 8000 ATS con el que cuenta el Departamento Energía Solar de la CNEA integra varios instrumentos para realizar ensayos de inversores fotovoltaicos, ya sea para su uso aislado o conectado a red eléctrica. Está desarrollado sobre un entorno de código abierto y diseñado específicamente para ensayar inversores fotovoltaicos. Sus principales características son:

- Permite ensayar inversores fotovoltaicos monofásicos de hasta 5kW.
- Integra varios instrumentos programables, incluyendo una fuente de corriente continua (DC), un analizador de energía y una fuente de alterna.
- Permite medir los siguientes parámetros: factor de potencia, distorsión total armónica de la corriente o tensión, inyección de corriente continua a la red, potencia activa y reactiva, factor de cresta y frecuencia.
- Soporta interfaces de comunicación estándar como IEEE-488, RS-232C, I2C y USB.
- Posee un entorno de programación completo que permite a los usuarios escribir o modificar sus propios programas de ensayo, o usar los que vienen preestablecidos de fábrica.

El sistema de mediciones de inversores ATS 8000 de Chroma está compuesto por una fuente DC 62050H-600S cuyos valores máximos son 8,5A y 600Vdc. La fuente AC 6560 puede entregar hasta 6000VA, con forma de onda sinusoidal, cuadrada o sinusoidal recortada y permite programar variaciones de tensión, corriente, frecuencia, fase y distorsión.

El Analizador de Energía 66202 permite medir hasta 500Vrms y 20Arms en un rango de frecuencia entre 15Hz y 10kHz, o en DC. Algunos parámetros que analiza son valor eficaz o pico de tensión y corriente, potencia activa, potencia aparente o potencia reactiva. Resulta de particular interés para analizar los inversores fotovoltaicos también la posibilidad de medir inyección de corriente continua y distorsión total armónica en corriente o tensión.

En la figura 1 se puede apreciar el equipo con todos sus componentes y alguno de los inversores ensayados.



Figura 1: Sistema de mediciones de inversores ATS 8000 de Chroma

CARACTERIZACIÓN DE INVERSORES

Las mediciones se realizaron sobre tres inversores fotovoltaicos comerciales de 1500W, 2800W y 4600W de distintos fabricantes. Se presentan los resultados de las mediciones del factor de potencia (PF), distorsión armónica total de corriente (THDi %) e inyección de corriente continua (DC) en función de la potencia inyectada por el equipo. Se adoptaron valores de potencia normalizados con respecto a la potencia nominal de cada uno a fin de comparar en un mismo gráfico los tres inversores. Por cada punto de trabajo se toman 80 mediciones, se promedian y se informa dicho valor. Luego de cada cambio de punto de trabajo se espera 20 segundos a que el inversor se estabilice para luego comenzar a realizar las siguientes mediciones.

El factor de potencia indica la relación entre la Potencia Activa y la Potencia Aparente de un equipo o una instalación eléctrica, y su valor se encuentra entre 0 (reactivo puro) y 1 (resistivo puro). Cuanto más reactivo sea el factor de potencia de una carga, se requiere más corriente para conseguir la misma cantidad de energía útil. Por esto resulta un parámetro de interés para las distribuidoras, ya que para obtener una red más eficiente debe estar cercano 1, de lo contrario para la misma potencia requerida se debe entregar más corriente, lo que implica cables más gruesos y más pérdidas. En la figura 2 se observa las mediciones del factor de potencia.

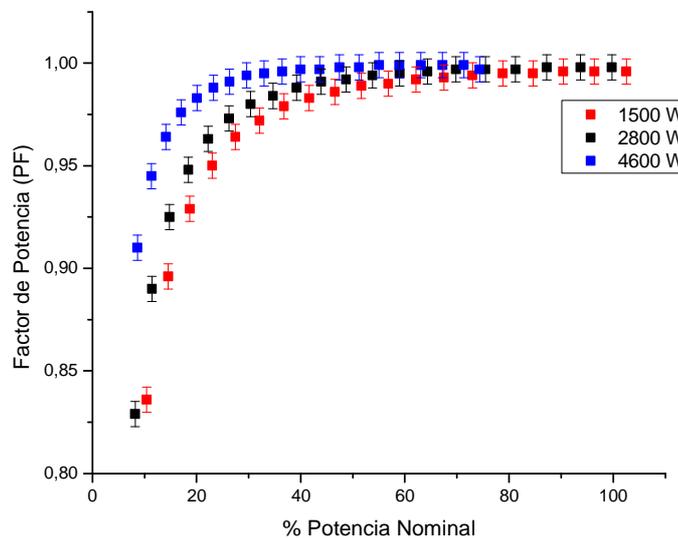


Figura 2: Curvas del factor de potencia en función de la potencia nominal (%) para los tres inversores ensayados.

El factor de potencia para valores de inyección superiores al 20% de la potencia nominal de los tres equipos, supera el valor 0.9 y se aprecia un leve aumento a medida que los mismos alcanzan su potencia nominal (valores muy cercanos a la unidad). Para bajos valores de inyección el factor de potencia cae pero el aporte de energía reactiva absoluta es pequeño.

La distorsión armónica de corriente total es un parámetro de calidad de la red de distribución eléctrica, y este efecto se produce cuando la carga bajo dicha red no es lineal. Esto se puede deber al arranque de un motor, etc. En la figura 3 se indica como varía la THDi para diferentes potencias.

Las consecuencias de una elevada distorsión de corriente en la red incrementa el valor eficaz de la misma, lo que produce sobrecargas y pérdidas por calentamiento. También puede producir torques oscilatorios en motores y generadores, y afectar mediante perturbaciones a los equipos electrónicos más sensibles.

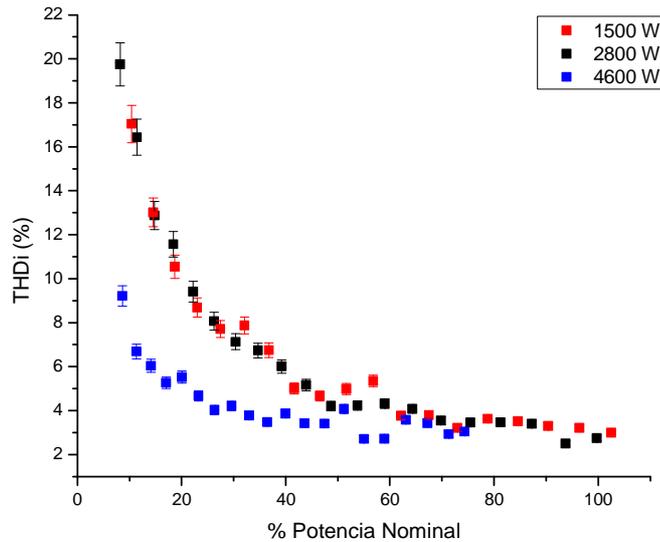


Figura 3: Curvas de la distorsión armónica en función de la potencia nominal (%) para los tres inversores ensayados.

La distorsión armónica de corriente en función de la potencia entregada por los inversores alcanzan sus valores mas bajos (aproximadamente 3% de THDi) cuando la potencia de trabajo de los inversores es cercana a la potencia nominal. A medida que disminuye la potencia inyectada, el porcentaje de armónicos en relación con la componente fundamental de corriente (50 Hz) va aumentando, pudiendo alcanzar en baja inyección valores cercanos al 20%. Esto sucede ya que a medida que la potencia inyectada disminuye, baja la componente fundamental de la corriente inyectada.

La inyección de corriente continua en la red alterna puede producir daños en equipos, particularmente en transformadores debido al calentamiento por la corriente extra. Los resultados de la medición de la inyección de corriente continua se muestran en la figura 4, destacándose que para unos pocos casos, una corriente de bajo valor ingresa al inversor.

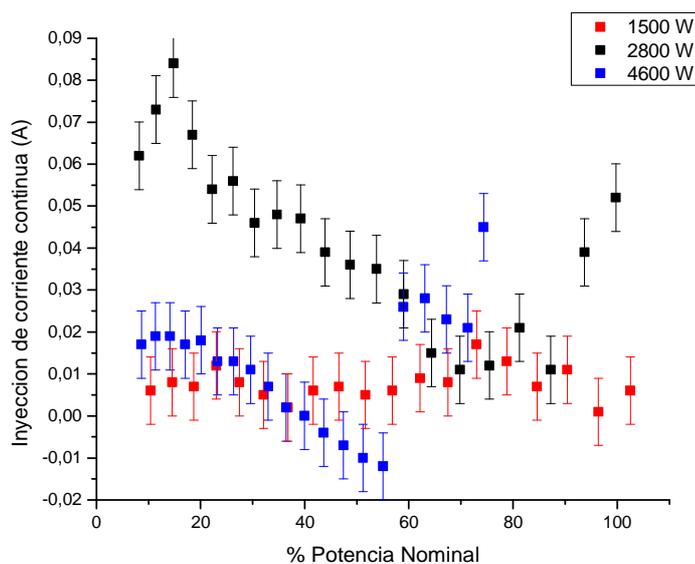


Figura 4: Curvas de la inyección de corriente continua en función de la potencia nominal (%) para los tres inversores ensayados.

Se observa que en ningún caso y en todo el rango de operación de los equipos se inyectaron corrientes mayores a 85mA, siendo este aporte insignificante en relación a la corriente alterna inyectada.

ENSAYO ANTI-ISLA

El ensayo anti-isla se basó parcialmente en uno de los puntos de la Norma VDE0126-1-1 en la cual, se simulan condiciones de consumo local que podrían llevar al inversor a funcionar en estado de isla. Dichas condiciones consisten en igualar la generación de potencia activa del inversor con un consumo próximo [W] cuando, además, existe conectado un circuito resonante LC paralelo cuya potencia reactiva [VAR] al menos duplica numéricamente la potencia activa en juego. En este trabajo se presenta el detalle del ensayo y los resultados obtenidos.

Equipamiento utilizado

El equipamiento utilizado para realizar el ensayo se detalla a continuación:

Fuente de alimentación DC regulada 0-300V con limitación de corriente 0-14A

Inversor Sirio 1500X

Osciloscopio digital con entradas aisladas

Banco de capacitores de 132uF x 600V (2kVAR)

Capacitores auxiliares de 0.68uF x 600V

Reactancia de 78mH (2kVAR)

Resistencia de potencia de 49 Ohm (1kW)

Autotransformador Variable (Variac) 2kVA

Circuito empleado y condiciones de ensayo

La tensión de entrada del inversor fue provista por la fuente regulada de tensión continua y la potencia activa seleccionada para el ensayo fue de 1kW.

El resistor, inductor y capacitor se conectaron en paralelo con la salida AC del inversor formando un circuito oscilante RLC, sintonizado a 50Hz.

Se utilizó un Variac para ajustar la potencia consumida por la carga y el agregado de capacitores permitió sintonizar finamente la frecuencia de oscilación del circuito RLC.

Ambos, el circuito RLC y el inversor se conectaron mediante interruptores separados a la red.

El circuito RLC se dimensionó con un Q de 2, como se establece en la norma. La potencia tomada por la carga se igualó con aquella entregada por el inversor con un error de $\pm 3\%$.

A tensión nominal, la distorsión armónica de la corriente del inductor se mantuvo por debajo del 3%.

Se aplicaron las siguientes relaciones para el ajuste del capacitor e inductancia:

$$L = \frac{V^2}{2\pi \cdot f \cdot P \cdot Q} \quad C = \frac{P \cdot Q}{2\pi \cdot f \cdot V^2} \quad (1)$$

Donde V es la tensión de la red (220V), f es la frecuencia (50Hz), P es la potencia consumida por la carga (1kW). El circuito utilizado en el ensayo es el que se muestra en la Figura 5 y su implementación se aprecia en la Figura 6.

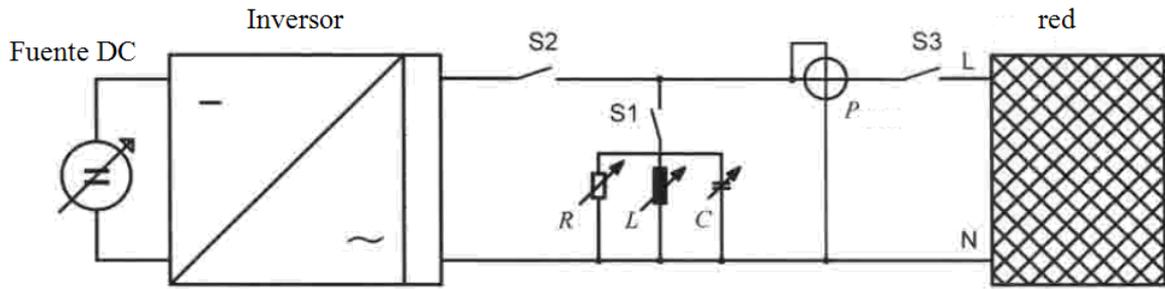


Figura 5. Circuito de prueba, el dispositivo de desconexión automática está integrado en el inversor.

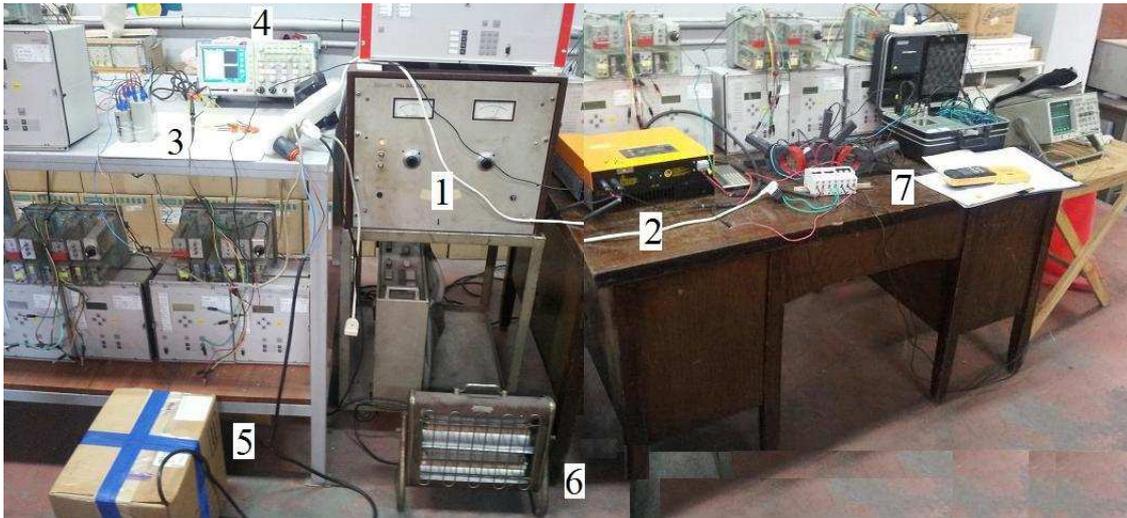


Figura 6: Vista de la configuración utilizada durante el ensayo: 1) fuente de alimentación DC, 2) inversor Sirio1500, 3) banco de capacitores, 4) osciloscopio, 5) reactancia, 6) carga resistiva, 7) pinzas amperométricas y llaves de corte.

Procedimiento de ensayo

El ensayo se realizó de la siguiente manera:

1. La potencia de salida del inversor se ajustó usando la fuente de alimentación DC.
2. El sistema se conectó a la red cerrando S3 y S2. Sin el circuito RLC conectado (S1 abierto) se midió y ajustó la potencia activa (P) del inversor a 1kW.
3. El inversor se desconectó de la red (S2 abierto)
4. El circuito oscilante se balanceó de la siguiente manera:
 - a) La inductancia se ajustó para que el Q del circuito oscilante sea 2 ($Q_L = 2kVAR$)
 - b) El capacitor se ajustó para que $Q_C = -Q_L$
 - c) El circuito oscilante y el inversor se conectaron a la red (S1, S2 y S3 cerrados) y el inversor fue puesto en operación.
 - d) La resistencia se ajustó para que la potencia activa tomada desde todo el circuito oscilante sea igual a P, utilizando la lectura de las pinzas amperométricas.
5. Se procedió a abrir S3 y medir el tiempo que tardó el inversor en desconectarse de la red, este proceso se repitió en cinco ocasiones y se tomó como valor de desconexión el mayor de los tiempos medidos.

Mediciones realizadas

Se ajustó el circuito RLC previo al ensayo obteniéndose los siguientes valores:

Corriente inductiva: 9,08 Ampere (2kVAR)

Corriente capacitiva: 9,1 Ampere (2kVAR)

Corriente en la carga: 4,5 Ampere (1kW)

Se verificó la frecuencia de oscilación natural del circuito RLC con $Q = 2$, obteniéndose como resultado una frecuencia de 48,5Hz, valor permitido para los inversores (47,5Hz a 50,2Hz) según muestra la Figura 7.

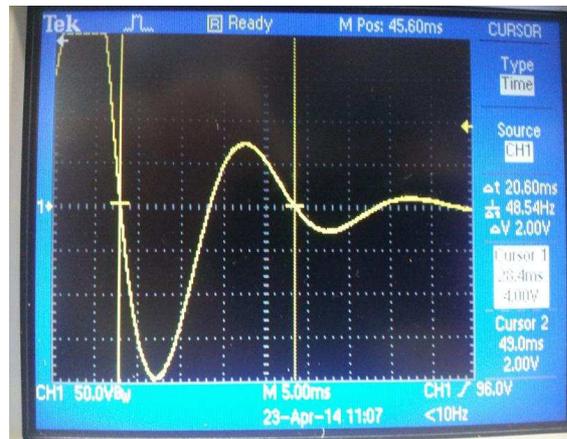


Figura 7 Extinción del circuito resonante RLC de $Q = 2$ a una potencia activa de 1kW. La frecuencia de relajación es de 48,5Hz

Se puso en funcionamiento el inversor con su salida conectada en paralelo a la red de 220Vca y al circuito oscilante (S1, S2 y S3 cerradas) y se reajustó el valor de la carga para minimizar la corriente provista por la línea, es decir sobre S3. Posteriormente fue desconectada la red del sistema y medido el tiempo de desconexión del inversor.

Se realizaron cinco pruebas de desconexión, dando en todas resultados aceptables según la norma (la que más tardó en desconectar duro 1,5 s mientras que la norma establece un máximo de 5 s. En la figura 8 se muestra el resultado de una de las pruebas.

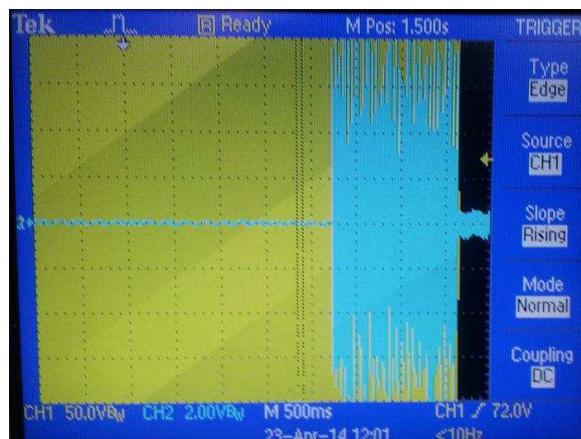


Figura 8. El barrido amarillo representa la tensión a la salida del inversor, la misma se extingue aproximadamente 1,5s después de la desconexión de la línea (comienzo del barrido azul)

CONCLUSIONES

A partir de la adquisición del sistema de mediciones de inversores ATS 8000 de Chroma el DES de la CNEA tiene la capacidad de analizar inversores de hasta 5kW monofásicos permitiendo analizar su desempeño bajo condiciones controladas y sus características más importantes.

Se verificó el correcto funcionamiento del circuito de desconexión automática del inversor Sirio 1500X a una potencia de trabajo de 1kW cuando se produce una caída de la red, aún para condiciones extremadamente críticas de carga local que podrían simular la existencia de la red.

Las mediciones realizadas sobre los inversores verifican las especificaciones técnicas dadas por los fabricantes.

ABSTRACT

This paper presents the first measurements of photovoltaic inverters for grid connection using automated test equipment. Certain features such as power factor, harmonic distortion and DC injection of commercial inverters of 1500W, 2800W and 4600W are respectively compared.

The results of a test to study the islanding detection of these inverters are also presented, using a parallel RLC load circuit tuned to the frequency of network. The acquisition of this equipment allows to DES further progress in the analysis of such systems.

Keywords: solar energy, PV inverter

REFERENCIAS

VDE V 0126-1-1):2013-08 (2013) Automatic disconnection device between a generator and the public low voltage grid.

Copa I., Socolovsky H. P., Godfrin E. M., Martínez Bogado M. G., Durán J. C., "Evaluación del funcionamiento de un sistema FV de 2,8kW con sombreado parcial". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 18, pp.04.69-04.75, 2014

Durán J. C., Socolovsky H. P., Raggio D., Godfrin E. M., Jakimczyk J., Martínez Bogado M. G., Díaz F. J., Castro N. E., Pedro G., Sepúlveda O., Argañaraz C., Benítez E., Roldán A., Righini R. "Proyecto Iresud: Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos, estado de avance a Julio de 2014 y primeras mediciones en sistemas piloto." Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 18, pp.04.57-04.67, 2014

Eyras, R., Durán J., " Proyecto IRESUD: Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos", Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía - ELUREE2013, 2013.

Socolovsky H., Fernández Wortman E., Muñoz S., Di Santo J., Durán G. I., Martínez Bogado M. G., Durán J. C., Estado de avance del proyecto "Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos", Actas de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), Vol. 1, pp.04.45-04.51, 2013.