

PUESTA EN MARCHA Y ESTUDIO DE LA OPERACIÓN EN CAMPO DE MICRO-INVERSORES DE POTENCIA PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

S. B. Jacob^{1,2}, S.S Tedoldi⁵, G. J. Murcia^{1,2}, J. C.Branda^{1,2}, J. Fischer^{1,3}, J. L.Strack^{1,4}, D. Carrica^{1,3}

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

LEyDE (Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos), LIC (Laboratorio de Instrumentación y Control)

Juan B. Justo 4302 CP 7600 Mar del Plata FAX 0223- 4 810046 Tel: 0223 4816600

Email: santtedo@gmail.com

Recibido 09/08/16, aceptado 08/10/16

RESUMEN:

En este trabajo se estudia el sistema asociado a la operación y monitoreo de dos micro-inversores de potencia, desarrollados por el Laboratorio de Instrumentación y Control de la Universidad Nacional de Mar del Plata y Lytron SA. Cada micro-inversor inyecta a la red la energía generada por un panel fotovoltaico de 290 Wp. Ambos paneles, cada uno con su respectivo micro-inversor, se encuentran emplazados en la azotea de la Facultad. Además, se realiza una comparativa del desempeño de los micro-inversores individuales frente al de inversores de mayor potencia que inyectan actualmente la energía generada por arreglos de 6 paneles fotovoltaicos de las mismas características. Los mismos forman parte de la planta piloto de la Facultad, que integra el proyecto IRESUD. Se describe el tratamiento de los datos de irradiancia a fin de estimar el recurso solar en el plano de los paneles fotovoltaicos. Se presentan los datos de recurso y producción obtenidos durante tres semanas en el mes de abril. Luego, se toman como objeto de comparación dos días típicos, uno nublado y el otro soleado, relevando curvas de recurso y producción de los sistemas solares bajo estudio. Finalmente, se concluye que este tipo de inversores tiene un rendimiento aproximado al de los inversores convencionales, dejando en evidencia que el precio por unidad de potencia sería el factor determinante al momento de la elección del inversor que adoptará un sistema fotovoltaico.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, micro-inversores de potencia, interconexión a la red.

INTRODUCCIÓN

La principal fuente de generación de electricidad de Argentina es de origen térmico, basada en combustibles fósiles. De la generación bruta del mercado mayorista eléctrico (MEM) acumulada de 2016 a junio de este año, el 66% corresponde a generación térmica, el 27,5% a generación hidroeléctrica y el 6,1% a generación nuclear, mientras que menos del 1% corresponde a fuentes renovables, tales como eólica y fotovoltaica (CAMMESA, 2016), como se observa en la Figura 1.

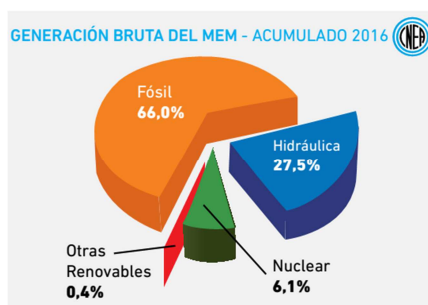


Figura 1: Generación de energía eléctrica acumulada para el año 2016 en la Argentina
Fuente CAMMESA

Como se observa en la Figura 1 la contribución de las energías renovables a la generación bruta nacional es escasa, por lo que resulta imprescindible promover la diversificación de la matriz energética, en particular mediante la introducción gradual de otras fuentes renovables de energía, como la solar y la eólica (H. Socolovsky, 2013).

Según la Comisión Nacional de Energía Atómica, la demanda de energía de los últimos 20 años ha sido siempre creciente. En los últimos diez años el valor de energía anual demandada por el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) creció casi un 40%, al ritmo que muestra la Figura 2.

¹Docente Facultad de Ingeniería UNMDP, ²Investigador UNMDP, ³Investigador CONICET, ⁴Becario doctoral del CONICET, ⁵Alumno Avanzado de la Facultad de Ingeniería y becario de investigación de la UNMDP.

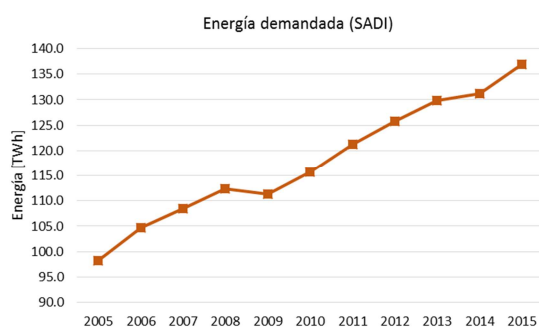


Figura 2: Demanda total bruta del SADI en los últimos 10 años
Fuente CAMMESA

De lo anterior se desprende que se deberían utilizar más eficientemente los recursos renovables para afrontar una demanda creciente, y así incrementar el uso de las energías limpias, mejorando el rendimiento global de las redes de distribución energéticas de generación distribuida (GD) (Momoh, 2012). La generación solar fotovoltaica, por su adaptabilidad y por la creciente competitividad de su costo de instalación, es una fuente renovable con amplia perspectiva de aplicación a la GD en redes de distribución de baja tensión residenciales, pudiéndose prever que alcancen un elevado nivel de penetración.

La Ley 26190, sancionada hace 10 años, establecía que en 2016 un 8% de la generación eléctrica nacional provendría de fuentes limpias. Lamentablemente, no se llegó ni al 1%, y el Estado se propuso corregir esta situación. En septiembre del 2015 se sancionó la Ley 27191 que establece modificaciones sobre la Ley 26190. En términos de objetivos, se extendió el plazo al 2017 sobre el 8% de la generación eléctrica y, una nueva meta: llegar al 2025 con un 20% de participación renovable en la matriz de energía eléctrica nacional. Además, para profundizar el compromiso con el medio ambiente y para facilitar el cumplimiento de las metas marcadas, en marzo de este año se lanzó el Decreto 531/2016 que reglamenta el régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables destinada a la producción de energía eléctrica (Energía Estratégica, 2016).

El 18 de mayo de 2016 a través de las Resoluciones 71/2016 y 72/2016 del Ministerio de Energía y Minería se dio inicio al Proceso de Convocatoria Abierta para la contratación en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) de generadores renovables con un requerimiento total de 1000 MW, bajo el denominado “Programa Renovar-Ronda 1”. De esta manera, se reemplazarán combustibles fósiles por energías más limpias contribuyendo al cuidado del medio ambiente. Estos 1000 MW se incorporarían a la matriz energética del país y estarían divididos en 600 MW de generación eólica, 300 MW de generación solar, 65 MW de Biomasa, 20 MW de Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos y 15 MW de Biogás. Con estas nuevas incorporaciones, el país ahorraría unos 300 millones de dólares al año en importación de combustibles para generación eléctrica.

Apoyando el desarrollo de proyectos sustentables y la creación de conocimiento en materia de instalación, operación y optimización de sistemas fotovoltaicos que inyecten energía a la red, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar Del Plata (FI-UNMDP) cuenta con una planta piloto fotovoltaica produciendo energía desde el año 2014 con una potencia instalada de 5,22 kWp. La misma está formada por 18 paneles dispuestos en 3 arreglos, sobre soportes construidos con espacio suficiente para ampliar su capacidad. Estos paneles inyectan energía a la red por medio de tres inversores concentradores marca SIRIO de 1,5 kW y su producción energética fue publicada en distintos congresos relacionados con la temática (Jacob et al. 2014; Jacob et al. 2015), en el marco del proyecto de investigación “Energías Renovables en Redes Eléctricas Inteligentes” (proyecto 15G/247), que tiene entre sus objetivos desarrollar tecnología de convertidores de potencia para realizar inyección a red de sistemas de generación distribuida, tanto eólicos como solares.

Como alternativa a los inversores convencionales similares a los instalados en la planta FV comentada, que deben ser dimensionados para convertir la energía de un grupo de paneles solares, existe en el mercado un tipo de convertidor que se emplea individualmente para cada panel, llamados micro-inversores (MI). Estos equipos presentan una serie de ventajas sobre los inversores convencionales. Una de ellas es la desvinculación de cada panel de una planta a la hora de afrontar sombreadamientos o fallas. Otra, es la habilidad de asistir a la inyección de energía en aplicaciones fotovoltaicas que usan paneles suficientemente separados uno de los otros, como por ejemplo luminarias solares.

El Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) del departamento de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (que participa del proyecto 15G/247 comentado) y Lytron SA para Petra Solar, una compañía estadounidense, desarrollaron un modelo de MI para el mercado estadounidense que aun no han sido puesto en operación de campo en Argentina.

Para conocer el desempeño de esta tecnología de desarrollo local se propuso la puesta en marcha y el monitoreo de estos micro-inversores. Este trabajo muestra el proceso de instalación y puesta en marcha de estos MI y su desempeño comparado con el de los inversores SIRIO comerciales ya instalados en de la planta FV piloto de la Facultad, en dos días de operación elegidos con diferentes condiciones de radiación que fue medida con una estación meteorológica instalada para este fin.

ARREGLO EXPERIMENTAL DE LAS INSTALACIONES FV

A continuación se describen las instalaciones FV para la evaluación de los MI desarrollados.

Descripción de la planta piloto FV con inversores concentradores.

La planta FV con inversores concentradores está formada por 18 paneles dispuestos en 3 arreglos, sobre soportes construidos con espacio suficiente para ampliar su capacidad, como se observa en la Figura 3. Los mismos inyectan energía a la red de la Facultad mediante 3 inversores monofásicos marca SIRIO de 1,5kW cada uno conectado a una de las tres fases. Los parámetros eléctricos se monitorean mediante un analizador de calidad de energía marca PQube, que adquiere todas las magnitudes a la entrada de un inversor y a la salida de los tres inversores.



Figura 3: Planta piloto FV en la terraza del edificio FI-UNMDP (inclinación de panel 30°)

Los paneles fotovoltaicos son de tipo poli-cristalinos marca NB-SOLAR de 290 Wp. En la Tabla 1 se presentan las características eléctricas de dichos paneles en condiciones de ensayo estándar (Standard Test Conditions - STC), es decir, irradiancia de 1000 W/m², temperatura de célula de 25°C y masa de aire AM 1,5 de acuerdo a la Norma EN60904-3.

Características Eléctricas	STC
Potencia Máxima (P _{máx})	290 Wp
Tensión a P _{máx} . (V _{mp})	35,2 V
Corriente a P _{máx} . (I _{mp})	8,24 A
Tensión a circuito abierto (V _{oc})	44,2 V
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	8,59 A
Eficiencia del módulo (η_m)	14,9 %

Tabla 1: Características de los paneles FV

La instalación y puesta en marcha de esta planta FV fue publicada en trabajos como Jacob et al. 2014 y Jacob et al. 2015.

Descripción de la planta FV con micro-inversores

Adicionalmente, sobre la primera estructura de la planta piloto FV con inversores concentradores se instalaron 2 paneles que inyectan energía a través de 2 micro-inversores individuales. Estos micro-inversores desarrollados localmente tienen como características las mostradas en la Tabla 2.

Potencia máxima de salida	240 W
Tensión de entrada	25 - 48 VDC
Corriente máxima de entrada	8,5 A
Tensión de salida nominal	240 VAC (211.2 – 264 V)
Frecuencia de salida	60 Hz
Corriente máxima de salida	1,15 A
Factor de potencia	0,99

Tabla 2: Características originales de los MI

Puede observarse que la tensión y la frecuencia de los MI tienen valores alejados de los propios de la red eléctrica de BT argentina (220V/50Hz de uso residencial monofásico). Además, la conexión prevista originalmente para estos equipos es a la red de BT estadounidense mostrada en la Figura 4. Dicha red de USA para sistemas residenciales se constituye de 3 conductores, de los cuales uno es el neutro (conectado al punto medio de un transformador de bobina partida) y los dos restantes son +/- 120 [V].

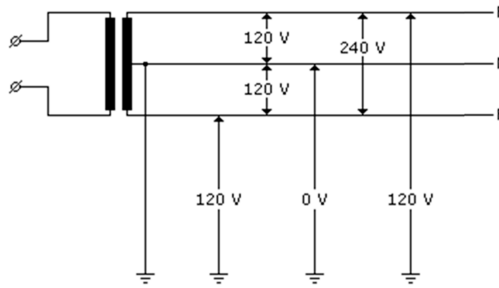


Figura 4: Sistema de distribución monofásica trifilar de USA

Esto implica que la conexión de los equipos debió ser adaptada para la red de BT local, generando un neutro artificial con dos resistencias iguales y de alto valor óhmico, cuyo punto común se conectó al punto medio o neutro del equipo. Este esquema fue probado verificando el correcto funcionamiento de los equipos en la red local. En la Figura 5 se muestra el esquema de conexión montado para la prueba.

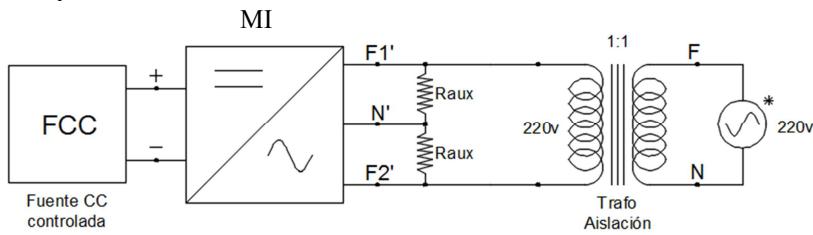


Figura 5: Esquema de prueba de un MI en laboratorio con punto neutro generado con resistencias

En la Figura 6 se muestra la mesa de laboratorio en la prueba de conexionado de los MI.



Figura 6: Mesa de laboratorio y detalle de las resistencias para la adaptación de la conexión

Una vez culminadas las pruebas de laboratorio y previo al montaje de los MI se realizaron las siguientes verificaciones:

La potencia del lado de corriente continua que recibirá el inversor depende de la potencia que genere cada panel FV. Se verificó que la potencia nominal del inversor esté entre 0,8 y 0,9 de la potencia pico del generador FV según la ecuación 1, en este caso de cada panel, como recomienda los manuales de instalación (ABB, Handbook N°10).

$$P_{INV} \approx (0.8 \sim 0.9) \cdot P_{GFV} \quad (1)$$

Además, se verificó que la tensión a circuito abierto en la salida del panel a la temperatura mínima prevista sea menor que la tensión máxima que puede soportar el inversor, y que la máxima corriente entregada por los paneles sea menor a la soportada por el convertidor.

En la conexión entre los paneles y los MI la elevada capacidad de transporte y el escaso aporte al cortocircuito de los paneles hacen que los conductores de 6 mm² utilizados no requieran de protección alguna. La conexión con la red se llevó a cabo por medio de una línea que conecta en paralelo a los dos MI y llega al tablero eléctrico del taller del LIC.

El cable utilizado en la línea de CA fue uno tipo taller de cobre bipolar de 2.5 mm² tendido dentro de un caño flexible para evitar los daños causados por la radiación UV. Esta línea fue verificada por su capacidad de transporte y protegida ante sobrecargas y cortocircuitos (AEA 90364, 2006) empleando un interruptor termomagnético C10 con 6kA de límite de corte. Además, se procuró que su caída de tensión no supere el 2 % (ABB, Handbook N°10), optimizando el rendimiento del sistema FV.

En la Figura 7 se muestran los MI conectados y montados en la estructura soporte de la planta FV. En la Figura 8 se observa un esquema unifilar de conexión de los MI.

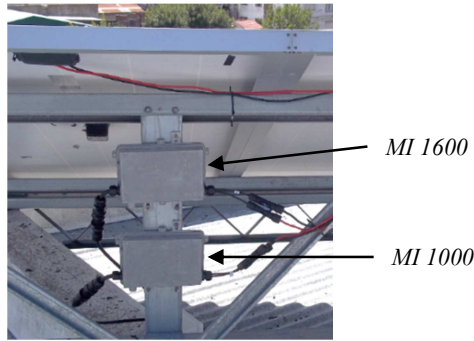


Figura 7: Conexión de los MI y su montaje en la estructura de soporte (inclinación de panel 30°)

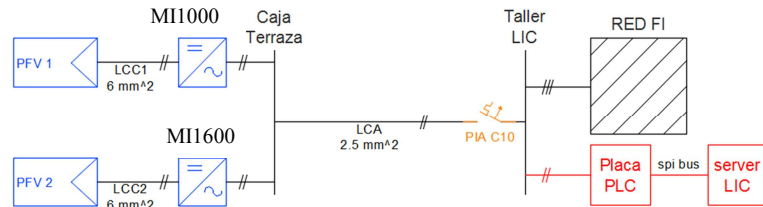


Figura 8: Esquema unifilar de conexión de los MI

El monitoreo de los inversores se realizó aprovechando las herramientas de medición y comunicación propias de cada equipo. Los MI cuentan con transductores de corriente, tensión, frecuencia, temperatura, entre otros, y además logran comunicarse a través de la red de energía, tecnología conocida como PLC (Power Line Communication). Esta información se solicita y almacena por un servidor operado con Arch-Linux utilizando el lenguaje de programación Python2 a través de una placa de adquisición PLC.

La placa PLC se conectó en paralelo a la línea de los MI con la red eléctrica, logrando enviar mensajes codificados que cada MI procesa. Luego, estos dan una respuesta que la placa filtra y la comunica al server para que pueda analizarlo. El servidor es un CPU de arquitectura x86_64 marca AMD. Cuenta con un procesador AMD Sempron™ (Processor 2800+) y corre el sistema operativo GNU/Linux. Éste es un sistema operativo ideal para funcionar como servidor, como se ve en la Figura 9.



Figura 9: Fotos del server y de la placa PLC

Para poder realizar una rápida inspección del funcionamiento de los MI se desarrolló un programa en Python2 llamado "inverters_console.py" que al ejecutarse en el servidor auspicia de consola, mostrando secuencialmente información que el servidor solicita y recibe de los equipos. En la Figura 10 se muestra una captura de pantalla de la consola en ejecución, en la que se observa que tanto el MI 1000 como el MI 1600 no están produciendo energía en esos momentos.

```
santiago@inverters:~/python/communication_servers
Last login: Tue Mar 1 16:23:55 2016 from 10.2.210.123
[santiago@inverters ~]$ cd python/communication_servers
[santiago@inverters communication_servers]$ python2 inverters_console.py
=====
Dispositivo: 3357353232380104001000 Fecha: 01-03-2016 16:52:05
temp : 23.200000
out power : -0.083300
frequency : 50.400000
out voltage : 223.030000
out current : 0.045000
out energy : 1.771700
in voltage : 42.090000
=====
Dispositivo: 335735323238030b001600 Fecha: 01-03-2016 16:52:07
temp : 23.100000
out power : -0.083300
frequency : 50.400000
out voltage : 223.320000
out current : 0.045000
out energy : 1.771700
in voltage : 42.090000
=====
```

Figura 10: Captura de pantalla de la consola durante una prueba

El registro de los datos de producción, según la normativa española EN 61724:1998, se debe realizar con un intervalo máximo de 1 minuto. Estos datos se obtienen mediante otro programa de Python2 llamado “data_collector.py”. Mediante systemd, un gestor del sistema y de los servicios para Linux, se establece al código “data_collector.py” en ejecución paralela simultánea al encendido del servidor.

Lo anterior permite que, mientras el servidor permanezca encendido y el software de comunicación llamado “plc_server.py” este corriendo, el programa adquisidor de datos se comunica con los MI, pidiendo la información de producción y estado, para luego almacenarla en dos archivos de formato CSV (Comma-Separated Values), uno para cada MI. La Tabla 3 muestra algunos de los datos recolectados por el servidor a modo de ejemplo.

Día	Temp [°C]	Frecuencia [Hz]	Tensión de entrada [V]	Tensión de salida [V]	Corriente de salida [A]	Potencia de salida [W]	Energía entregada [Wh]
02/03/2016 16:46	0	0	0	0	0	0,00	0,00
02/03/2016 16:47	32,7	50,49	34,32	222,16	0,762	167,47	18,21
02/03/2016 16:48	32,6	50,48	34,15	222,75	0,755	166,42	18,24
02/03/2016 16:49	32,4	50,46	34,26	222,56	0,754	166,03	18,26
02/03/2016 16:50	32,3	50,49	34,15	222,62	0,745	164,05	18,29
02/03/2016 16:51	32,2	50,49	34,37	222	0,741	162,72	18,32
02/03/2016 16:52	32,1	50,48	34,38	221,83	0,741	162,62	18,35

Tabla 3: Primeros datos del MI 1000

EVALUACION DEL RECURSO SOLAR Y SU TRATAMIENTO

El recurso solar se obtuvo de una estación meteorológica ubicada en las proximidades de la planta piloto FV. Esta cuenta con un sensor de irradiancia global en posición horizontal, lo que hizo necesario tratar los datos para poder estimar la radiación global en el plano inclinado de los paneles, a $\beta=30^\circ$ azimut norte. Este proceso requiere de la elección de un método de estimación.

Todos los métodos consideran a la irradiación solar en el plano inclinado compuesta por tres flujos:

$$Q_\beta = Q_{\beta b} + Q_{\beta d} + Q_{\beta r} \quad (2)$$

Donde:

$Q_{\beta b}$ es la radiación directa

$Q_{\beta d}$ es la radiación difusa

$Q_{\beta r}$ es la radiación reflejada por el suelo

Cada componente es dependiente de la radiación directa, difusa y global que incide en el plano horizontal según las siguientes expresiones,

$$Q_{\beta b} = R_b Q_b \quad (3)$$

$$Q_{\beta d} = R_d Q_d \quad (4)$$

$$Q_{\beta r} = R_r Q \quad (5)$$

Donde R_b , R_d y R_r son el cociente de la radiación incidente en una superficie inclinada respecto a una superficie horizontal para las componentes directa, difusa y reflejada, respectivamente. Finalmente,

$$Q_\beta = R_b Q_b + R_d Q_d + R_r Q \quad (6)$$

Radiación reflejada por el suelo:

Esta componente de la radiación global está caracterizada por la reflectancia o albedo del suelo (ρ) y su cálculo es simplemente la descomposición geométrica que incide de esa radiación reflejada en el plano del panel,

$$R_r = \rho \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad (7)$$

Radiación difusa en el plano inclinado:

Los numerosos modelos que existen para la estimación de la radiación difusa hacen dificultosa la tarea de la elección de uno. La mejor respuesta para los planos inclinados a 30° y 45° se obtiene del modelo de Ma e Iqbal (M.J. Denegri, 2012). Este modelo es de tipo anisotrópico y su ecuación es:

$$R_d = KR_b + \left(1 - K \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \quad (8)$$

Donde K es el índice de claridad, es decir, la relación entre la radiación global medida y la radiación que se percibiría a cielo limpio:

$$K = \frac{Q}{Q_0} \quad (9)$$

Donde Q_0 es la irradiancia extraterrestre sobre un plano horizontal:

$$Q_0 = \frac{Q_{sc}}{pr^2} \cos(\theta z) \quad (10)$$

Donde Q_{sc} es la constante de irradiancia extraterrestre, pr^2 es el coeficiente de corrección de la distancia Tierra-Sol y θz es el ángulo cenital instantáneo.

Radiación directa en el plano inclinado:

La radiación directa es un factor de corrección estrictamente geométrico y su coeficiente se calcula como:

$$R_b = \frac{\cos(\theta z) \cos(\beta) + \sin(\theta z) \sin(\beta) \cos(\gamma_s - \gamma)}{\cos(\theta z)} \quad (11)$$

En la cual γ_s es la azimut solar instantánea y γ es la azimut local de la planta, ambas con referencia norte como 0° .

Descomposición de la radiación global horizontal:

La radiación global del plano horizontal, dato medido por la estación meteorológica, se puede descomponer en sus tres componentes con la siguiente expresión (Jacovides C.P., 2010):

$$Q_d = \begin{cases} 0.968Q & \text{si } K \leq 0.1 \\ Q(0.959 + 0.395K - 3.7K^2 + 2.7K^3) & \text{si } 0.1 < K < 0.85 \\ 0.276Q & \text{si } K \geq 0.85 \end{cases} \quad (12)$$

Luego, la radiación directa en el plano horizontal es:

$$Q_b = Q - Q_d \quad (13)$$

RESULTADOS

Se evaluó el recurso solar y producción de los sistemas FV (piloto y MI) durante 3 semanas del mes de abril de este año, específicamente desde el 09/04 al 23/04.

Respecto al recurso solar mediante scripts desarrollados en Matlab se estimó el mismo para una inclinación de panel de 30° según las ecuaciones (2) a (13), resultando los valores de la Tabla 4 expresados en unidad de energía por unidad de superficie (kWh/m^2):

Fecha	Recurso solar [kWh/m^2]	
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 30^\circ$
09/04/2016	1,6880	2,2003
10/04/2016	2,5494	3,5468
11/04/2016	2,5620	3,5417
12/04/2016	2,8761	4,1077
13/04/2016	1,1468	1,4722
14/04/2016	4,1010	6,1825
15/04/2016	0,8478	1,0650
16/04/2016	1,4942	1,9572
17/04/2016	0,8923	1,0742
18/04/2016	3,0569	4,5241
19/04/2016	0,8577	1,0658
20/04/2016	4,1108	6,3702
21/04/2016	3,9935	6,2011
22/04/2016	3,1256	4,7379
23/04/2016	2,0051	2,8136

Tabla 4: Recurso solar diario (medido a 0° y estimado a 30°)

Respecto a la producción energética de los dos MI se calculó la energía promedio producida y luego los índices de producción por unidad de superficie (Ys) y por kWp de potencia (Yf) (Jacob et al, 2015). Estos resultados se muestran en la

Tabla 5, para lo que se consideran los valores de 1,94 m² de superficie y 0,29 kWp de potencia en condiciones SCT para cada panel FV.

Fecha	Energía [kWh]	Ys [kWh/m ²]	Yf [kWh/kWp]
09/04/2016	0,4476	0,2307	1,5436
10/04/2016	0,7268	0,3746	2,5062
11/04/2016	0,6974	0,3595	2,4049
12/04/2016	0,7335	0,3781	2,5292
13/04/2016	0,2908	0,1499	1,0028
14/04/2016	1,1841	0,6104	4,0832
15/04/2016	0,1511	0,0779	0,5209
16/04/2016	0,3645	0,1879	1,2570
17/04/2016	0,2118	0,1092	0,7304
18/04/2016	0,9170	0,4727	3,1620
19/04/2016	0,2286	0,1178	0,7882
20/04/2016	1,3157	0,6782	4,5369
21/04/2016	1,2443	0,6414	4,2906
22/04/2016	0,9518	0,4906	3,2821
23/04/2016	0,5779	0,2979	1,9929

Tabla 5: Producción en índices de un MI promedio

Respecto a la producción energética de la planta piloto FV se tomaron los datos de producción registrados del arreglo 1 de la planta piloto en los días bajo análisis. Este arreglo tiene 6 paneles, es decir que su energía producida por panel es 1/6 de la expresada en la Tabla 6.

Date	Energía [kWh]	Ys [kWh/m ²]	Yf [kWh/kWp]
09/04/2016	3,2466	0,2789	1,8659
10/04/2016	5,0884	0,4371	2,9244
11/04/2016	5,0088	0,4303	2,8786
12/04/2016	5,7693	0,4956	3,3157
13/04/2016	2,0890	0,1795	1,2006
14/04/2016	8,3532	0,7176	4,8007
15/04/2016	1,5123	0,1299	0,8692
16/04/2016	2,6332	0,2262	1,5133
17/04/2016	1,5484	0,1330	0,8899
18/04/2016	6,5616	0,5637	3,7710
19/04/2016	1,6623	0,1428	0,9553
20/04/2016	9,2922	0,7983	5,3403
21/04/2016	8,8161	0,7574	5,0667
22/04/2016	6,6395	0,5704	3,8158
23/04/2016	4,1076	0,3529	2,3607

Tabla 6: Producción e índices de la planta FV

Además, para profundizar el análisis se trabajó sobre dos días típicos: el 19/04, un día completamente nublado, y el 20/04, un día soleado. A continuación se muestran los resultados de la estimación del recurso en el plano de los sistemas FV y posteriormente se representa la comparación entre el recurso y la producción de estos mismos.

Recurso en el plano horizontal vs. recurso estimado a $\beta=30^\circ$ y azimut local 0° :

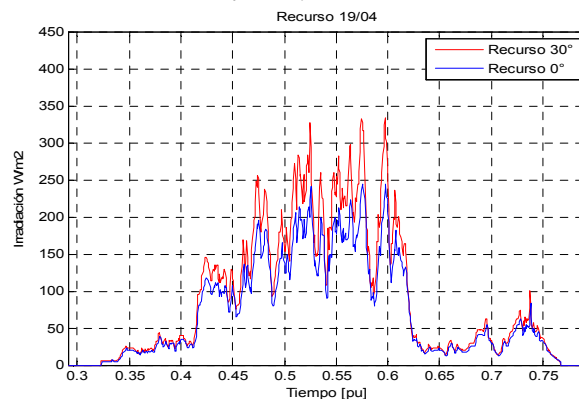


Figura 11: Recurso del 19/04 a 0° (azul) y a 30° (rojo)

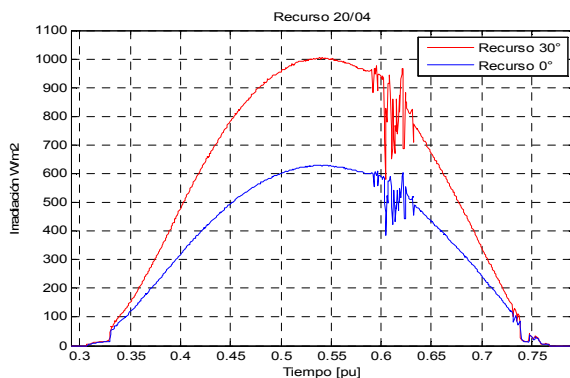


Figura 12: Recurso del 20/04 a 0° (azul) y a 30° (rojo)

Recurso vs. producción de los sistemas FV:

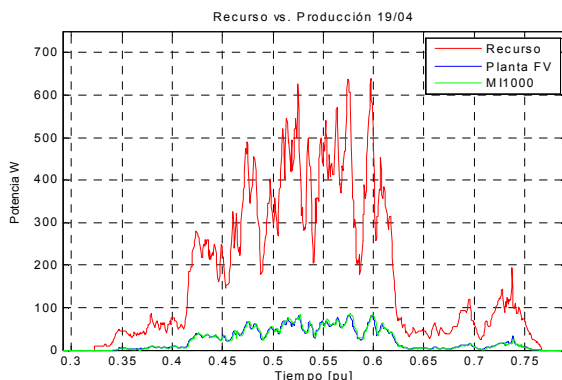


Figura 13: Recurso a 30° (rojo), producción de la planta FV (azul) y producción del MI1000 (verde) el 19/04

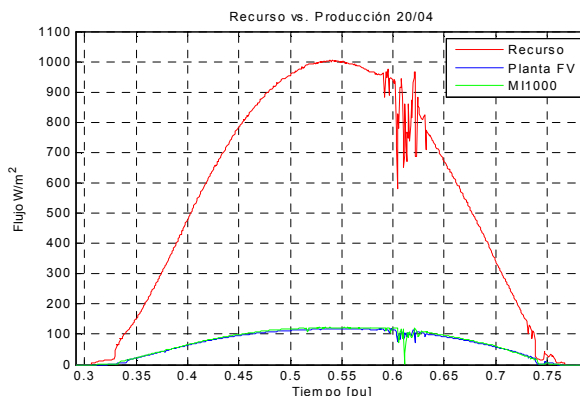


Figura 14: Recurso a 30° (rojo), producción de la planta FV (azul) y producción del MI1000 (verde) el 20/04

Integrando las curvas anteriores se obtienen los valores de energía por unidad de superficie de recurso y de producción. Esto permite calcular el rendimiento global de los sistemas que se muestra en la Tabla 7.

Fecha	MI1000	Planta FV
19/04/2016	13,54 %	13,10 %
20/04/2016	13,09 %	12,59 %

Tabla 7: Rendimiento global en cada día bajo estudio

Además, como los paneles utilizados son de iguales características, resulta útil inferir el rendimiento de los inversores de cada sistema considerando el rendimiento de los paneles como 14,9 %, según indica el fabricante, lo que se muestra en la Tabla 8.

Fecha	MI1000	SIRIO
19/04/2016	90,84 %	87,94 %
20/04/2016	87,85 %	84,51 %

Tabla 8: Rendimiento inferido de los inversores

Corresponde aclarar que los parámetros de producción de la planta FV corresponden al equivalente de lo producido por un único panel.

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la puesta en marcha y operación de los MI logrando adaptar su configuración a la red local inyectando así energía producida por paneles FV. Se utilizó un sistema de adquisición de datos que logró comunicar los MI mediante tecnología PLC, que además, es útil para comandar los equipos o cambiar su configuración.

Por otro lado, se pudo estimar el recurso solar en el plano de la planta a partir de los datos de irradiancia provistos por la estación meteorológica, destacando que la misma tiene incertidumbres propias del método anisotrópico empleado que parece sobrestimar fuertemente el recurso solar. Teniendo en cuenta que este dato afecta por igual los rendimientos calculados para ambas tecnologías a comparar, los resultados no estarían influenciados por la incertidumbre del método.

Con la información y la producción registrada de la planta FV piloto, se logró comparar estimativamente el desenvolvimiento de los MI con el de los inversores comerciales marca SIRIO de 1,5 kW de potencia, obteniendo como resultado que el desempeño de los micro inversores tienen un rendimiento comparable al de aquellos comerciales que operan en la planta piloto.

Finalmente los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la característica de la instalación eléctrica a alimentar y el costo de la inversión a realizar serán los factores claves para la elección entre una tecnología u otra.

REFERENCIAS

- ABB. (Pag. 28 de Handbook N°10). Plantas Fotovoltaicas. *Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N° 10*.
AEA 90364. (2006). *Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles*.
CAMMESA. (15 de mayo de 2016). *Informe mensual - Principales variables del mes, marzo 2016*. Obtenido de [www.cammesa.com.ar](http://portalweb.cammesa.com.ar): <http://portalweb.cammesa.com/memnet1/Pages/descargas.aspx>
C.P., J., J., B., D.N., A., & N.A., K. (2010). Comparing diffuse radiation models with one predictor for partitioning incident PAR radiation into its diffuse component in the Eastern Mediterranean basin. *Renewable Energy* 35, 1820-1827
Energía Estratégica. (26 de julio de 2016). *El Gobierno publicó en Decreto Reglamentario de la Ley 27191 de energías renovables*. Obtenido de www.energiasestrategica.com: <http://www.energiasestrategica.com/el-gobierno-reglamento-la-ley-27-191-de-energias-renovables/>
Jacob, S. B., Murcia, G. J., Branda, J. C., Garín, E., Echeverría, N., Tedoldi, S. S., & Souza, C. N. (2015). Análisis de desempeño de una planta fotovoltaica conectada a la red de baja tensión en Mar del Plata. *ASADES*.
Jacob, S. B., Murcia, G. J., Branda, J. C., Garín, E., Echeverría, N., Tedoldi, S. S., & Souza, C. N. (2015). Montaje y producción energética de una instalación fotovoltaica conectada a la red de baja tensión en la ciudad de Mar del Plata. *CLAGTEE*.
Jacovides C.P., B. J. (2010). Comparing diffuse radiation models with one predictor for partitioning incident PAR radiation into its diffuse component in the Eastern Mediterranean basin. *Renewable Energy* 35, 1820-1827.
M.J. Denegri, C. R. (2012). Evaluación de Diferentes Modelos Utilizados para la estimación de la Radiación Fotosintéticamente Activa en Planos Inclinados. *ASADES - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
Momoh, J. (2012). "Smart Grid: Fundamentals of design and analysis". *Wiley-IEEE Press*.
REN21. (15 de mayo de 2015). *Renewables 2015 - Global Status Report*. Obtenido de www.ren21.net: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf
REN21. (15 de mayo de 2016). *Renewables 2014 - Global Status Report*. Obtenido de www.ren21.net: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
Socolovsky, E. W. (2013). Estado de avance del proyecto de Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos. *Acta de la XXXVI Reunión de ASADES* (págs. Vol. 1 04.45 - 04.51). ISBN.

ABSTRACT: This paper studies the system involved in the operation and monitoring of two micro-inverters, developed by the Laboratorio de Instrumentación y Control of the Facultad de Ingeniería of the Universidad Nacional de Mar del Plata and Lytron SA. Each micro-inverter delivers to the grid the power generated by single photovoltaic panels with 290 Wp. Both, panels and micro-inverters, are settled in the roof of the building of the engineering school. Also, a comparison is made of the performance between individual inverters with others of higher power, of which the latter are injecting power from arrays of six identical photovoltaic panels. They are part of the photovoltaic solar plant of the engineering school, integrating the IRESUD project. Is described the data treatment of solar irradiance which aim to estimate the solar resource in the tilted plane of the panels. Resource and production data from three weeks of April are shown. Then, two typical days, one cloudy and one sunny, are taken as object of comparison displaying trends of resource and production from the solar systems under study. Finally, it is concluded that this type of inverters has an approximate performance to conventional inverters, manifesting that the price per watt peak unit would be the main factor for choosing the inverter which makes up a photovoltaic system.

Key Words: photovoltaic solar energy, micro-inverters, grid connection.