

## **EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN DOS CASOS DE ESTUDIO: DISTORSIÓN ARMÓNICA INYECTADA POR UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 40 KW Y EMITIDA POR LAS CARGAS DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR**

**J. C. Durán<sup>1,2</sup>, D. Raggio<sup>1,2</sup>, H. P. Socolovsky<sup>1,2</sup>, M. Videla<sup>1</sup>, J. Plá<sup>1,3</sup>**

Comisión Nacional de Energía Atómica - Departamento Energía Solar  
Av. General Paz 1499 - 1650 San Martín - Prov. de Buenos Aires - Argentina  
Tel.: 011-6772-7132 - E-mail: duran@andar.cnea.gov.ar

*Recibido 11/08/16, aceptado 10/10/16*

**RESUMEN:** Los posibles efectos de la conexión de sistemas fotovoltaicos (FV) a la red eléctrica sobre la calidad del servicio, en particular en lo referente a la inyección de componentes armónicas, suelen ser una preocupación de las empresas distribuidoras y los entes de regulación. A fin de aportar datos cuantitativos en relación con este tema, se analizó la calidad de la energía: (i) en el punto de conexión de un sistema FV de 40 kW instalado en el Polo Científico y Tecnológico, y (ii) en uno de los circuitos eléctricos de una vivienda unifamiliar. Por un lado, las mediciones realizadas en el sistema FV permitieron verificar que las componentes armónicas de corriente inyectadas a la red están claramente por debajo de los límites establecidos por la norma IEC 61000-3-2. Por su parte, las mediciones efectuadas en la vivienda muestran que las componentes armónicas de corriente emitidas por electrodomésticos son significativamente mayores que las armónicas inyectadas por un inversor FV de potencia típica para una vivienda unifamiliar. Los análisis realizados permiten afirmar, en consecuencia, que la conexión de sistemas FV a la red eléctrica no afecta la calidad del servicio en cuanto a la distorsión armónica.

**Palabras clave:** sistema fotovoltaico, red eléctrica, generación distribuida, inversor, distorsión armónica, calidad.

### **INTRODUCCIÓN**

El mercado fotovoltaico (FV) mundial ha tenido un fuerte crecimiento durante los últimos años como consecuencia de las políticas de promoción implementadas por diversos países, que han impulsado la instalación de sistemas FV conectados a la red de distribución eléctrica. Esto ha producido un nuevo récord de capacidad instalada durante 2015, con unos 50 GW a nivel global, totalizando una capacidad de 227 GW (REN21, 2016). Las Figuras 1 y 2 muestran, respectivamente, la evolución histórica del mercado FV mundial en el período 1995-2015, y los países con mayor potencia FV instalada a fines de 2015.

En algunos países, la generación solar FV tiene un rol importante: durante 2015, satisfizo el 7,8% de la demanda de electricidad en Italia, 6,5% en Grecia, y 6,4% en Alemania. Europa tiene una capacidad FV instalada para satisfacer el 3,5% del consumo eléctrico total, contra 0,3% en 2008, y el 7% de la demanda pico (REN21, 2016). Si bien hasta recientemente la demanda de sistemas FV estuvo concentrada en los países desarrollados, en la actualidad los mercados emergentes en los 5 continentes contribuyen de manera significativa al crecimiento global, particularmente en países en desarrollo.

---

<sup>1</sup> Departamento Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

<sup>2</sup> Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM).

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Como consecuencia del crecimiento descrito, los precios internacionales de los sistemas FV y especialmente de los módulos FV, han tenido una baja muy significativa en los últimos años, llevando el costo de la generación FV a valores prácticamente competitivos con la generación convencional en una cantidad importante de mercados, estimándose que la paridad con la red se alcanzará en la mayoría de los países durante la corriente década (Laborde y Williams 2016).

Por otra parte, la generación FV distribuida<sup>4</sup> ha ido ganando mercado, muy especialmente en países europeos donde ha tenido una posición predominante. Más allá de sus ventajas comparativas con respecto a la generación centralizada en cuanto a la disminución de pérdidas de energía por transmisión, recientes estudios para el caso particular de los EE.UU. muestran que el costo de la energía FV tiene un mínimo para centrales de potencia de entre 0,5 y 1 MW, cuando se consideran los costos de transmisión (Farrell, 2016). Según la consultora MERCOM, la penetración de la generación distribuida en el mercado FV creció de 30,8% en 2014 a 42,3% en 2015 (MERCOM, 2016). A nivel global, se estima que en 2016 la generación distribuida (instalaciones de menos de 5 MW, en sectores residenciales, comerciales e industriales) tendrá una participación del 39% del total de la generación eléctrica FV conectada a la red (Munsell, 2016).

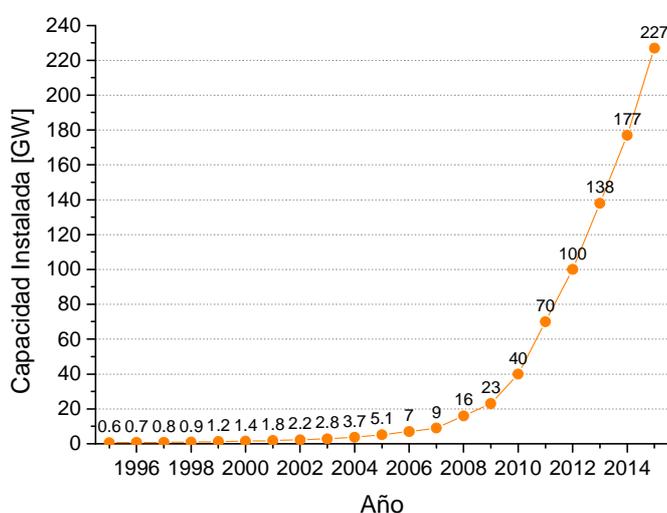


Figura 1: Evolución de la capacidad FV acumulada instalada en el Mundo (REN21, 2016; Laborde y Williams, 2016; Statista, 2015).

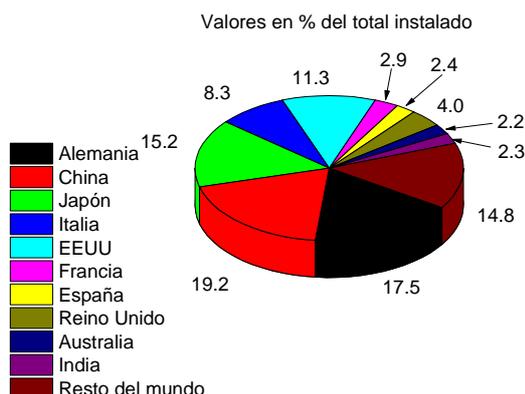


Figura 2: Países con mayor potencia FV instalada al año 2015 (elaboración propia con datos extraídos de Statista (2015)).

La situación en la Argentina es significativamente diferente, siendo la contribución de las energías renovables, excluyendo la generación hidroeléctrica de gran escala, muy pequeña. En particular, en 2015 la participación de la energía eólica y solar en la matriz eléctrica fue de sólo 0,44%, provista, en

<sup>4</sup> Se denomina generación distribuida a la generación de electricidad cerca del lugar de consumo (Ackermann, 2001).

su gran mayoría, por energía eólica (CAMESA, 2016). Resulta, en consecuencia, imprescindible promover la diversificación de la matriz energética, en particular mediante la introducción gradual de otras fuentes renovables de energía como la solar y eólica.

Hasta el año 2009, la capacidad FV instalada en el país estaba mayormente ubicada en áreas rurales dispersas y alejadas de las redes eléctricas de distribución. A partir del año 2010 y como consecuencia de una serie de políticas nacionales y provinciales de promoción que favorecieron la instalación de centrales de potencia basadas en fuentes renovables, la capacidad FV instalada en la Argentina ha crecido significativamente. En 2011 se puso en operación la planta fotovoltaica de 1,2 MW (Gambetta y Doña, 2011) en Ullúm, San Juan, entre 2012 y 2013 se instalaron 7 MW FV (Programa GENREN; ENARSA, 2016) en Cañada Honda, San Juan, y en 2014 se inauguró una planta de 1 MW en San Luis (Agencia de Noticias San Luis, 2014).

En el marco de la Ley 27191, el Gobierno Nacional lanzó a mediados de 2016 el Programa RenovAr con el objeto de comenzar a recorrer el camino hacia una participación significativa de las energías renovables en la matriz eléctrica del país. En la Ronda 1 de dicho Programa (Programa RenovAr – Ronda 1, 2016) se licitaron centrales por un total de 1000 MW (300 MW FV) y el 7 de octubre de 2016 se adjudicaron 17 proyectos por una potencia total de 1.109 MW (400 MW FV).

Con el objeto de promover en el país la generación de electricidad mediante sistemas FV de pequeñas potencias (típicamente, entre 2 kW<sub>p</sub> y 50 kW<sub>p</sub>), integrados a edificios y conectados a la red eléctrica de baja tensión, el Consorcio Público-Privado IRESUD, conformado por la CNEA, la UNSAM y 5 empresas privadas, ejecutó, entre diciembre de 2011 y abril de 2016, el proyecto "Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos", en adelante, proyecto IRESUD (IRESUD, 2016). Este proyecto estuvo parcialmente subsidiado con Fondos Argentinos Sectoriales (FITS Energía Solar N° 0008-2010) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

Entre otras actividades, el proyecto IRESUD impulsó el desarrollo de leyes y normas relacionadas con la generación eléctrica distribuida mediante energías renovables, y dio lugar a la instalación de 55 sistemas piloto, con una potencia total de aproximadamente 180 kW<sub>p</sub>, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y 16 provincias del país (IRESUD, 2016).

Las provincias de Santa Fe (Resolución EPE N° 442/13), Salta (Resolución ENRESP N°1315/14) y Mendoza (Resolución EPRE N°019/15) han promulgado leyes y emitido resoluciones que autorizan y reglamentan la conexión a la red pública de sistemas de generación eléctrica basados en fuentes renovables. Asimismo, se han presentado en el Congreso Nacional diversos proyectos de ley con el mismo fin, mientras que la Subsecretaría de Energías Renovables está también trabajando en el desarrollo de la normativa correspondiente. Por su parte, la Asociación Electrotécnica Argentina ha fijado pautas para el diseño eléctrico de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión.

Existen diversos temas técnicos a considerar en relación con los sistemas FV de conexión a red, entre los que cabe destacar la variabilidad del recurso solar, la desconexión automática de los sistemas FV ante ausencia del suministro eléctrico de red (protección anti-isla) o parámetros eléctricos (tensión o frecuencia) fuera de rango, y el posible efecto sobre la calidad del servicio eléctrico (en particular, inyección de componentes armónicas en la red eléctrica). Si bien se trata de cuestiones técnicas que han sido resueltas hace años en países desarrollados, incluso en casos de alta penetración de generación FV (en Alemania, por ejemplo, existen picos de penetración en los cuales FV aporta más del 40% del consumo total), resulta necesario demostrar en el país que los inversores de corriente continua a corriente alterna (DC/AC) utilizados por este tipo de sistemas, cumplen con los requerimientos de seguridad y calidad de la energía inyectada. El presente trabajo pretende contribuir en esta dirección a través del estudio de dos casos:

- Medición y análisis de componentes armónicas de corriente y tensión, en un sistema FV de 40 kW<sub>AC</sub>, conectado a la red interna de uno de los edificios del Polo Científico y Tecnológico.
- Medición de componentes armónicas de corriente inyectadas a la red por las cargas de una vivienda unifamiliar y comparación de las mismas con las inyectadas por un inversor FV de 2,8 kW<sub>AC</sub>.

## SISTEMA FOTOVOLTAICO EN EL POLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

### *Configuración del Sistema*

El sistema FV instalado en la terraza de uno de los edificios del Polo Científico y Tecnológico, dependiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, está compuesto por:

- 157 módulos FV Worldwide Energy and Manufacturing USA Inc. (Amerisolar) AS-6P30-255.
- 2 inversores marca SMA, modelo STP 20000TLEE-10, de 20 kW cada uno.
- 1 Sunny WebBox y 1 Sunny Portal, para adquisición y transmisión de datos a través de internet.

Dicho sistema tiene la siguiente configuración:

- Acimut =  $-142^\circ$  - Inclinación =  $15^\circ$ .
- Generador FV 1: 4 cadenas de 22 módulos FV en serie cada una ( $22,4 \text{ kW}_p$ ) y un inversor. Tensión FV normal = 611 V – Corriente máxima del generador = 33,7 A
- Generador FV 2: 3 cadenas de 23 módulos FV en serie cada una ( $17,6 \text{ kW}_p$ ) y un inversor. Tensión FV normal = 639 V – Corriente máxima del generador = 25,3 A

### *Medición y análisis de la calidad de energía inyectada*

Se realizó el registro y análisis de la calidad de energía inyectada por los 2 generadores FV en conjunto, utilizando un analizador/registrador de red marca Dranetz, modelo Power Guia BMI440, con 3 pinzas amperométricas de 100 A. En particular, se registraron los valores RMS (*Root Mean Square*), promediados sobre intervalos de 1 minuto, de los siguientes parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencias activa y reactiva, factor de potencia, distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) y componentes armónicas de tensión y corriente. THD se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (RSS, *Root Sum of Squares*) de todas las componentes armónicas de la tensión o corriente, según corresponda. Se puede expresar en valores relativos a la componente fundamental o en unidades de tensión o corriente.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos en el período 21 de julio a 4 de agosto de 2016. Si bien las mediciones se realizaron sobre las 3 fases, se presentan únicamente resultados para una de las fases, denominada en adelante Fase A, dado que los inversores trifásicos como los utilizados en esta instalación funcionan en forma balanceada y el comportamiento de las 3 fases es similar.

La Figura 3 muestra los resultados de las mediciones del factor de potencia y la distorsión armónica total de corriente (THD, en Amperios) de la fase A, en función de la potencia activa inyectada por los 2 inversores en dicha fase. Aunque la potencia total máxima por fase del sistema es superior a 13 kW, sólo se grafica hasta 10 kW dado que la potencia inyectada superó este valor en muy pocas oportunidades, por tratarse de mediciones realizadas en invierno y para un sistema con los módulos FV con baja inclinación ( $15^\circ$ ). Se observa que el factor de potencia alcanza valores superiores a 0,95 a partir de una potencia activa inyectada de aproximadamente 1 kW. Por su parte, THD total fluctúa entre 0,6 A y 1 A, prácticamente independiente del punto de trabajo de los inversores.

Las Figuras 4 y 5 muestran las componentes armónicas de corriente impares (3, 5 y 7) y pares (2, 4, 6), respectivamente, en función de la potencia activa inyectada. Como referencia, se indican para cada componente armónica los límites para la emisión de corriente fijados por la norma IEC 61000-3-2 (IEC, 2016; Eduful et al., 2005), sobre “Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos con corriente de entrada  $\leq 16 \text{ A}$  por fase”, para equipos Clase A. Cabe destacar que el sistema FV bajo estudio no entra dentro de este rango (los 2 inversores juntos pueden inyectar más de 50 A por fase) y, aun así, la inyección de armónicos cumple holgadamente los límites fijados por la norma IEC 61000-3-2 (los armónicos de orden par son prácticamente despreciables).

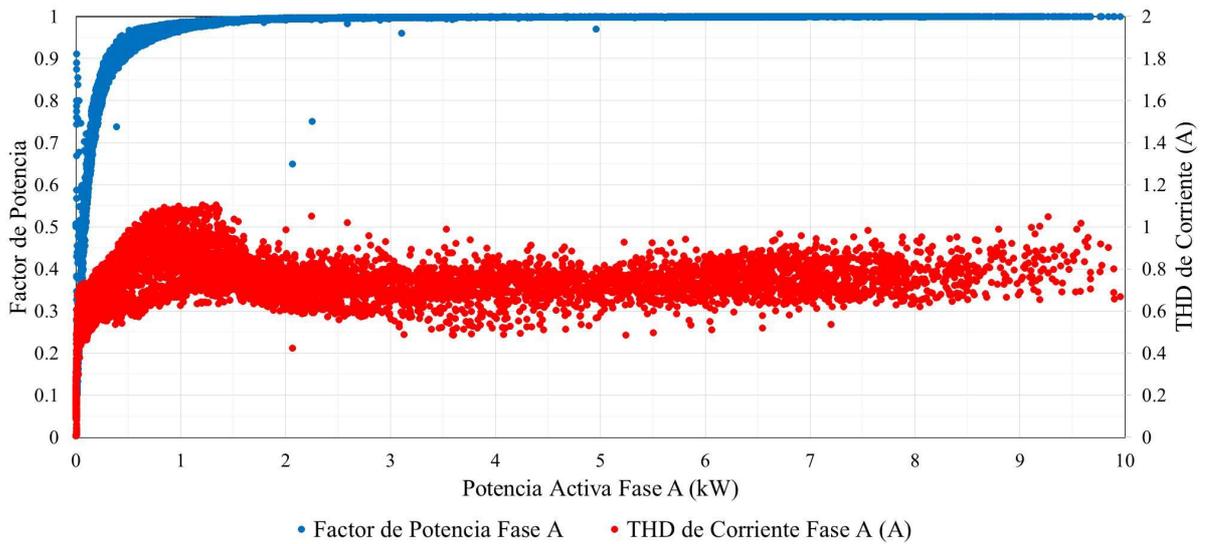


Figura 3: Factor de potencia y THD total de corriente (en A), en función de la potencia activa inyectada, para la Fase A.

Finalmente, se realizaron ensayos de desconexión y reconexión del sistema FV, a fin de evaluar la variación de la tensión de línea en el punto de conexión a la red y analizar posibles modificaciones del contenido de armónicos en tensión. Los cortes se realizaron en horarios cercanos al mediodía y por períodos de aproximadamente 30 minutos. La Tabla 1 muestra las mediciones realizadas en horario del mediodía del 28 de julio de 2016. Los valores presentados corresponden al promedio y la desviación standard de mediciones realizadas durante un período de aproximadamente media hora, de la componente fundamental de la tensión ( $N=1$ ) y las componentes armónicas impares desde  $N=3$  hasta  $N=9$  (las componentes pares son despreciables), con el sistema FV inyectando energía y con el mismo desconectado. Se observa que la componente fundamental se incrementa aproximadamente 1,4 V cuando se conecta el sistema FV, mientras que las componentes armónicas permanecen invariables dentro del intervalo de dispersión de las mismas.

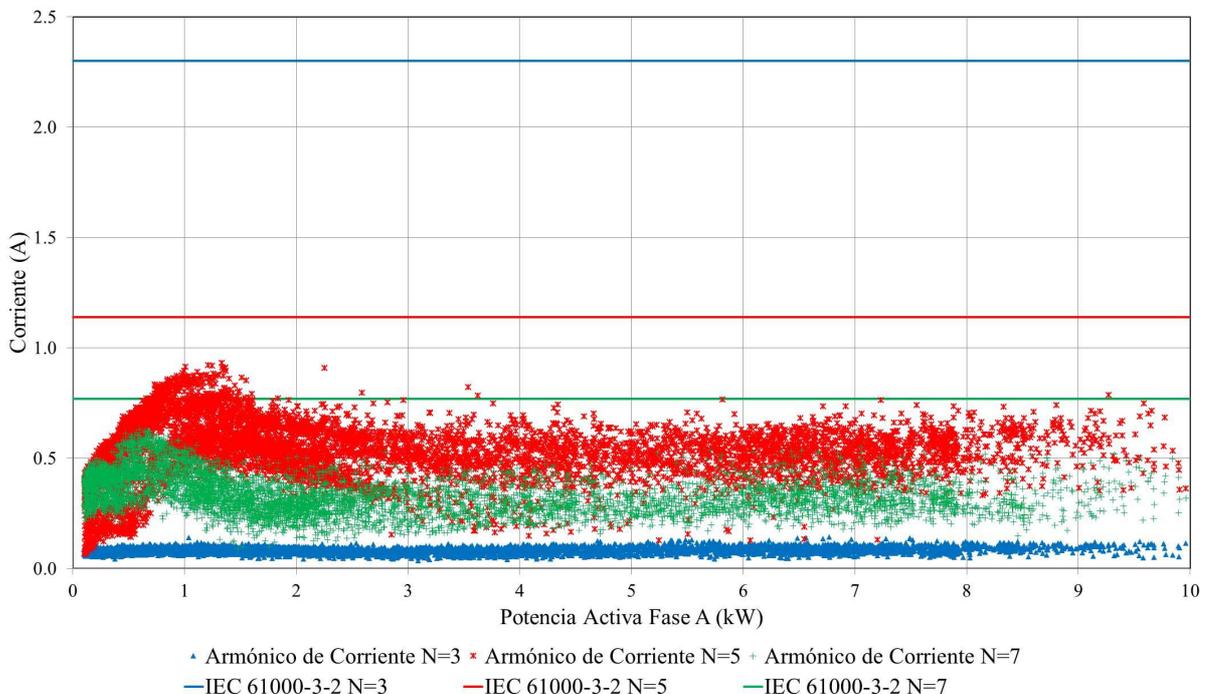


Figura 4: Componentes armónicas impares, 3, 5 y 7, en función de la potencia activa inyectada, para la Fase A. Se muestran los límites correspondientes fijados por la norma IEC 61000-3-2.

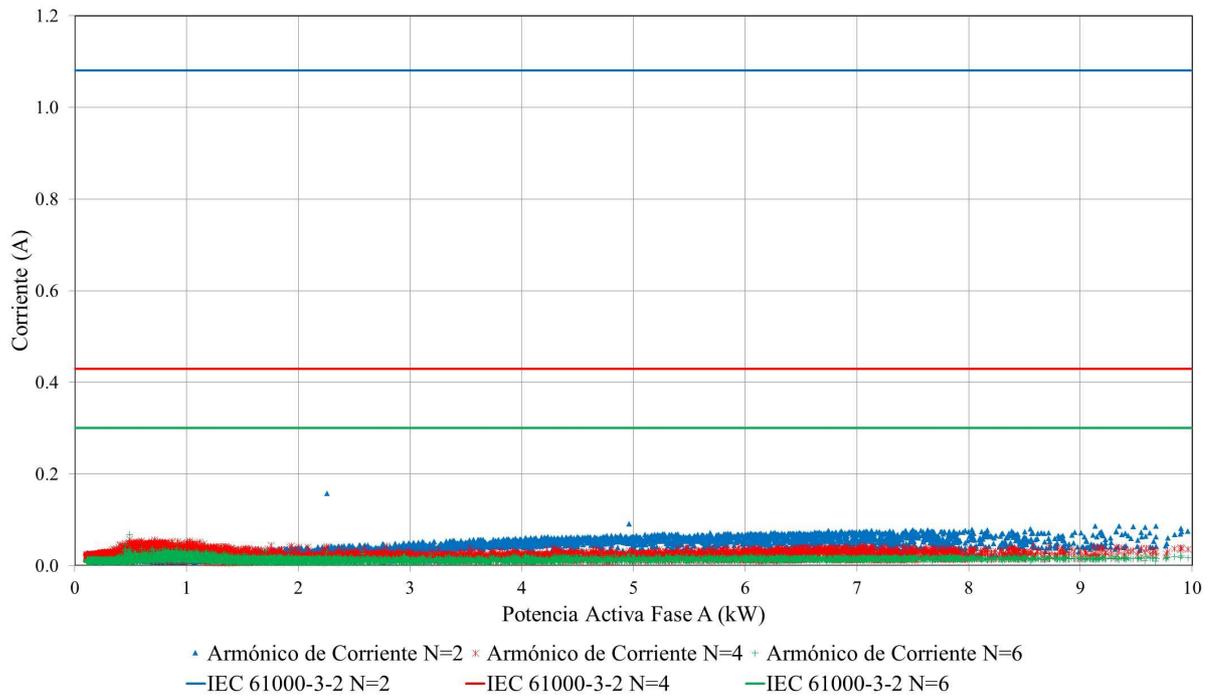


Figura 5: Componentes armónicas pares, 2, 4 y 6, en función de la potencia activa inyectada, para la Fase A. Se muestran los límites correspondientes fijados por la norma IEC 61000-3-2.

Sistema FV inyectando	Componente Armónica de Tensión				
	1	3	5	7	9
Promedio	225.80	3.89	2.71	0.35	2.49
Desviación Standard	0.36	0.12	0.09	0.11	0.09
Sistema FV desconectado					
Promedio	224.44	3.87	2.70	0.29	2.46
Desviación Standard	0.25	0.06	0.06	0.08	0.07

Tabla 1: Promedio y desviación standard de la componente fundamental de la tensión ( $N=1$ ) y las componentes armónicas, con el sistema FV inyectando energía y con el mismo desconectado.

## COMPONENTES ARMÓNICAS DE CORRIENTE EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR Y COMPARACIÓN CON UN INVERSOR FV DE CONEXIÓN A RED

Con el fin de comparar las corrientes armónicas inyectadas a la red eléctrica por un inversor FV de conexión a red con las emitidas por los equipos típicos de una vivienda (electrodomésticos, luminarias, etc.), se realizaron mediciones de calidad de la energía eléctrica en el tablero principal de una vivienda unifamiliar de aproximadamente 120 m<sup>2</sup> cubiertos.

### Vivienda unifamiliar

La vivienda bajo estudio corresponde a una tarifa T1-R2<sup>5</sup> de la compañía distribuidora Edenor S.A., y tiene un consumo anual de aproximadamente 4.500 kWh. La Figura 6 muestra el consumo bimestral en el período diciembre 2014 a mayo 2016. Las principales características de la instalación eléctrica de la vivienda son las siguientes:

<sup>5</sup> T1- R2 – Tarifa residencial con consumos bimestrales mayores a 300 kWh.

- Tiene 2 circuitos principales, uno que alimenta la parte de adelante de la vivienda (en adelante, denominado “frente”) y el segundo, la parte posterior (en adelante, “fondo”). Ambos circuitos se subdividen, a su vez, en subcircuitos de tomacorrientes e iluminación. En el caso del circuito del fondo, se agrega un subcircuito que alimenta el aire acondicionado del living-comedor.
- El circuito del frente alimenta: living-comedor, escritorio, cochera y cocina.
- El circuito del fondo alimenta: dormitorio, baño, quincho (con lavadero) y pequeño taller (de uso muy esporádico).
- El acondicionamiento de aire se realiza exclusivamente con equipos eléctricos, principalmente mediante 2 acondicionadores de aire frío/calor, con una capacidad de refrigeración/calefacción de 5,95 kW / 6,38 kW y 3,5 kW / 3,8 kW. El pico que se observa en la Figura 6 en el cuarto bimestre de 2015, está claramente asociado al acondicionamiento del ambiente en invierno.
- La iluminación es principalmente a base de tubos fluorescentes compactos y lámparas Led.

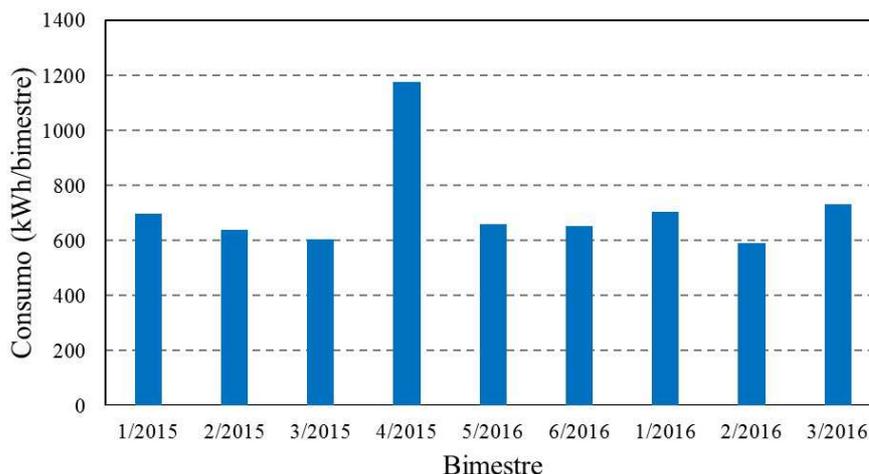


Figura 6: Consumo bimestral, en kWh, de la vivienda bajo estudio.

#### Mediciones de calidad de la energía eléctrica

Se realizaron mediciones de calidad de la energía eléctrica en los circuitos frente y fondo, utilizando un analizador/registrador de red marca Dranetz, modelo Power Guia BMI440, con 2 pinzas amperométricas de 10 A, entre los días 12 y 16 de junio de 2016. Se registraron los valores RMS, promediados sobre intervalos de 1 minuto, de los siguientes parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencias activa y reactiva, factor de potencia, THD total y componentes armónicas de tensión y corriente. A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos.

La Figura 7 muestra el consumo (potencia activa) en función de la hora, para el lunes 13 de junio de 2016. La potencia activa total es la suma de los consumos en el frente y el fondo de la vivienda. Se observan, en particular, los picos de consumo asociados a los equipos de aire acondicionado (circuito fondo, en azul) y también los pequeños picos por el encendido de los compresores de la heladera y el freezer (circuito frente, en rojo). Por su parte, en la Figura 8 se observa la corriente y la distorsión armónica total THD de corriente (ambas, en Amperios) del circuito fondo. Los elevados valores de THD, cercanos a 2 A (aproximadamente 15% de la componente fundamental N=1) son generados principalmente por los equipos de aire acondicionado (Moller et al., 2005).

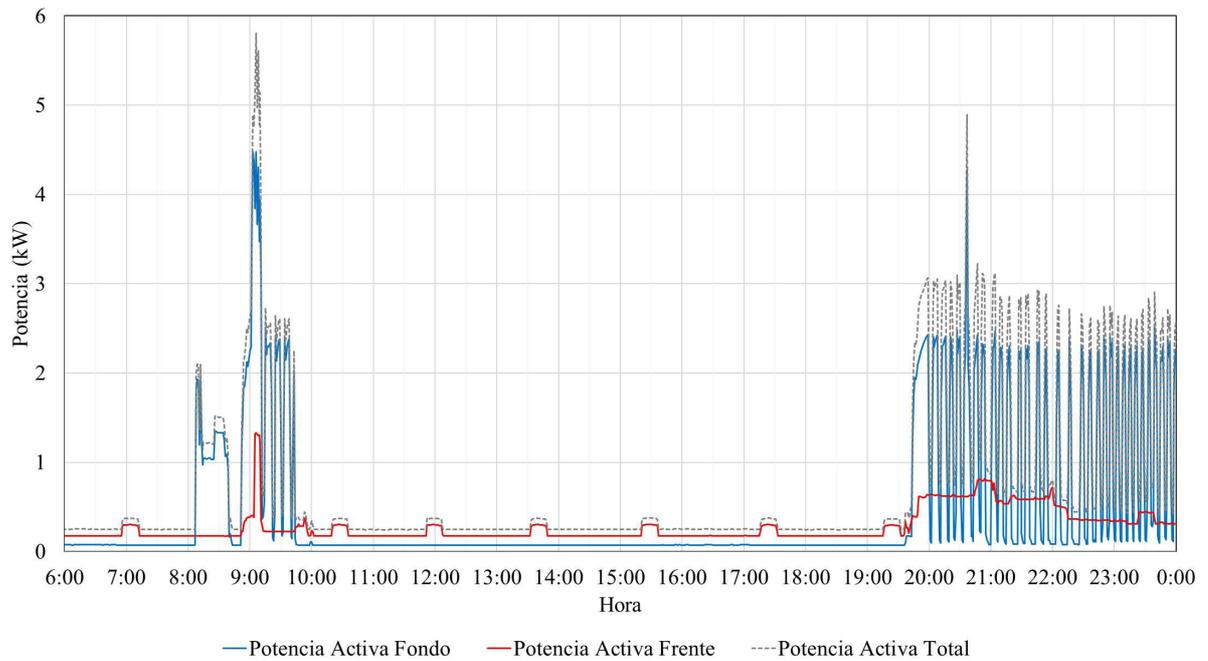


Figura 7: Potencia activa de la vivienda, en función de la hora, para el 13 de junio de 2016.

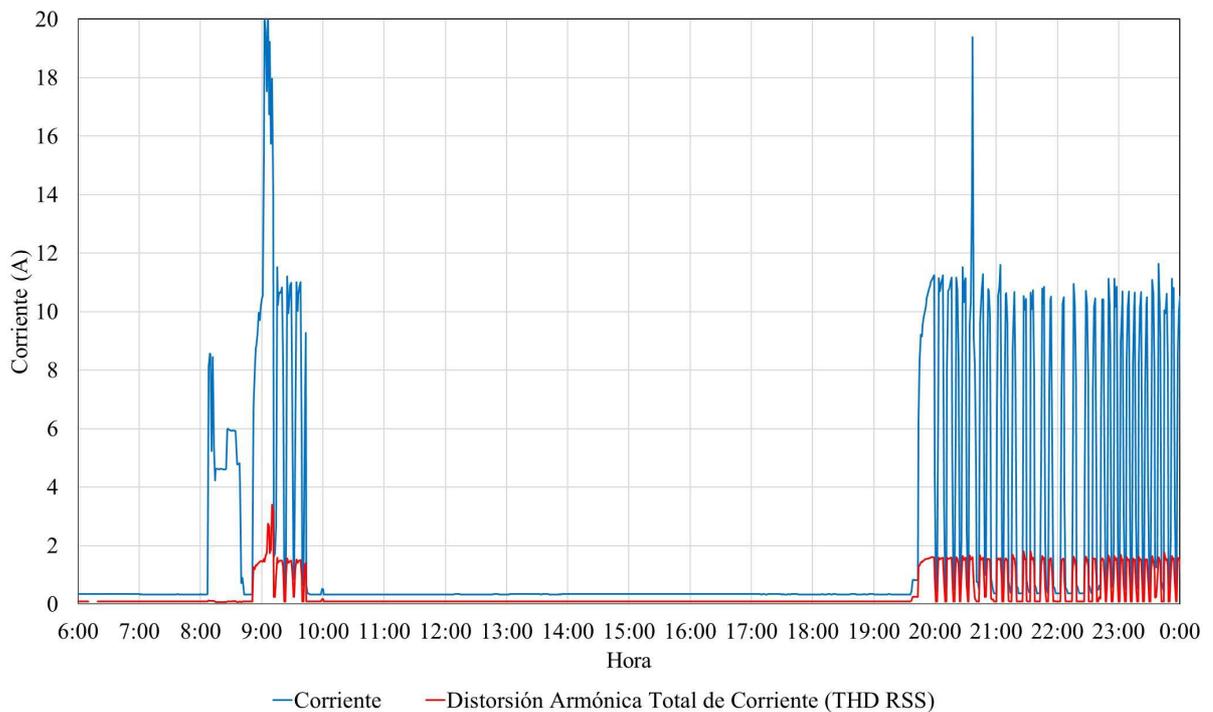


Figura 8: Corriente y distorsión armónica total, en función de la hora, el 13 de junio de 2016.

*Comparación de inyección de armónicos de corriente de un inversor FV con los inyectados por el equipamiento de la vivienda bajo estudio*

Se consideró un sistema FV de conexión a red que diera lugar a una inyección de energía anual similar al consumo de la vivienda bajo estudio (4.500 kWh/año), operando en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Dicho sistema está compuesto por 12 módulos FV, con 60 celdas solares de silicio policristalino, de 250  $W_p$  cada uno (potencia total de 3  $kW_p$ ) y un inversor DC/AC de conexión a red marca AEG, modelo PV Protect 2800, de 2,8 kW.

Las Figuras 9 y 10 muestran el contenido de componentes armónicas de corriente de orden 3, 5, 7 y 9, medidas en el circuito del fondo, en función de la hora, el 12 de junio de 2016. En las mismas figuras se indican también los valores de los armónicos inyectados a la red por un inversor AEG Protect PV 2800, medidos mediante el sistema Chroma 66202 para ensayo de inversores, y los correspondientes límites admitidos por la norma IEC 61000-3-2 para equipos Clase A (IEC, 2016).

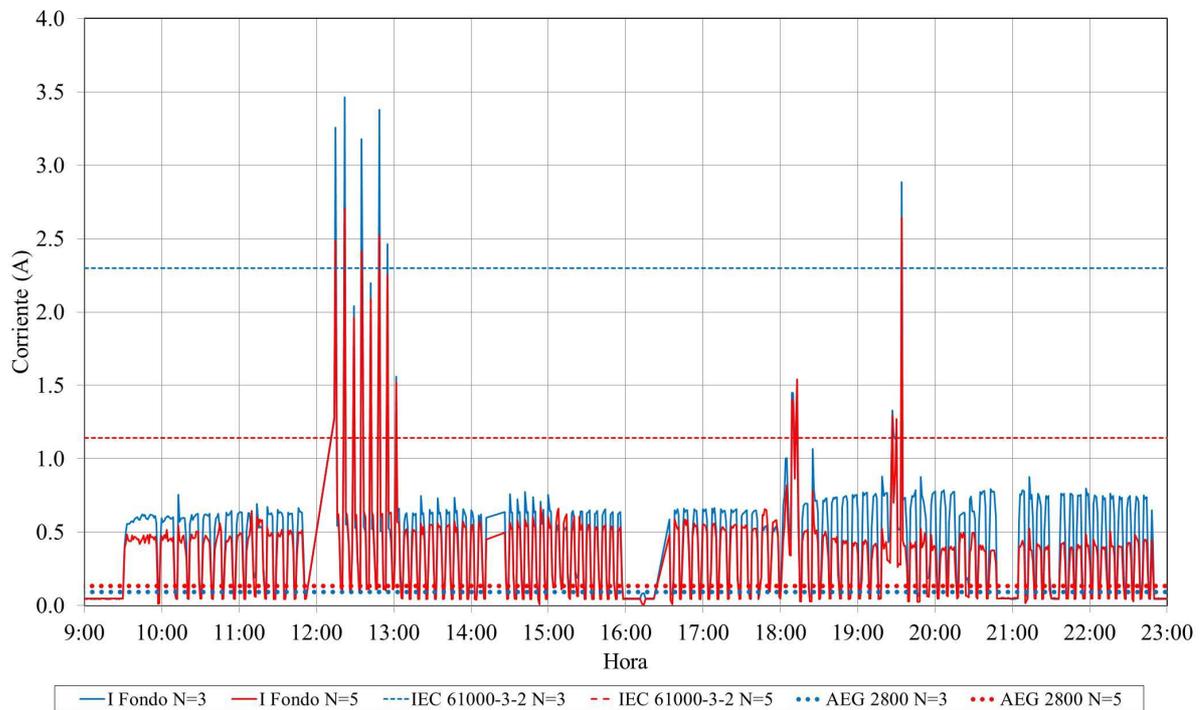


Figura 9: Componentes armónicas  $N=3$  y  $N=5$  de corriente en el circuito del fondo, en función de la hora, el 12 de junio de 2016. Se indican también los límites establecidos por la norma IEC 61000-3-2 para equipos Clase A, y el contenido de armónicos  $N=3$  y  $N=5$  medidos en un inversor AEG PV 2800.

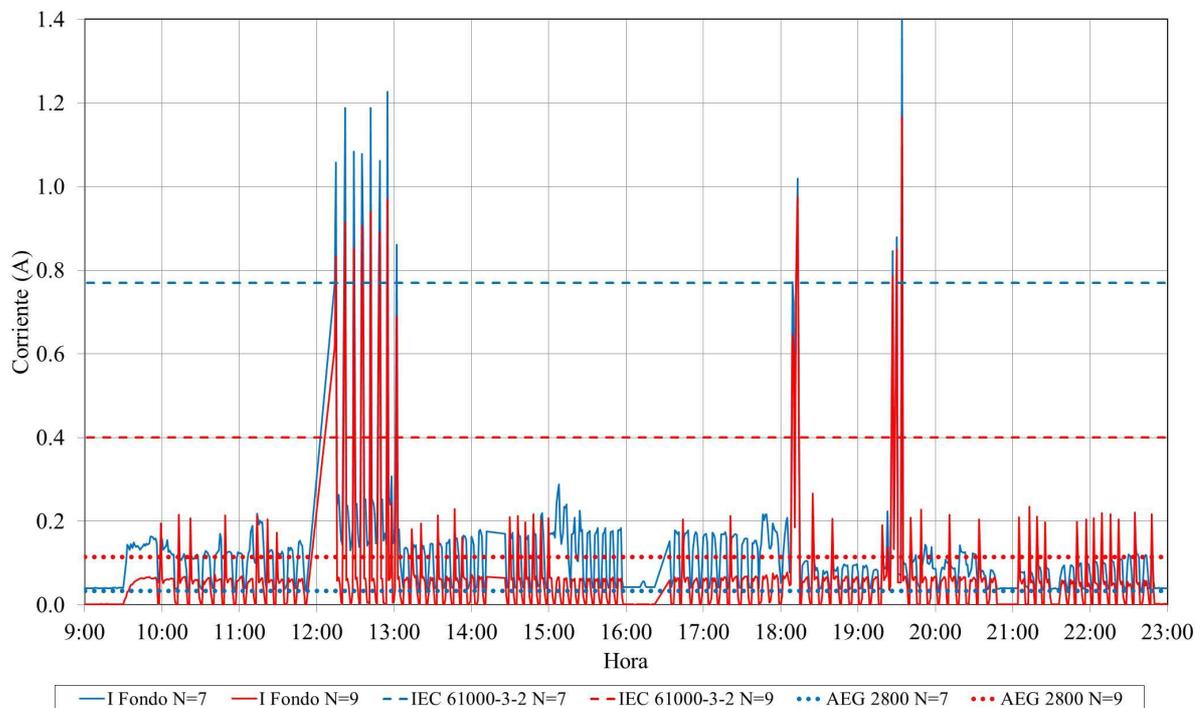


Figura 10: Componentes armónicas  $N=7$  y  $N=9$  de corriente en el circuito del fondo, en función de la hora, el 12 de junio de 2016. Se indican también los límites establecidos por la norma IEC 61000-3-2 para equipos Clase A, y el contenido de armónicos  $N=7$  y  $N=9$  medidos en un inversor AEG PV 2800.

Finalmente, en la Figura 11 se muestran los valores medidos el día 12 de junio de 2016 (máximos y promedios en el período 9:00 hs a 23:00 hs) de los armónicos impares de corriente (desde N=3 hasta N=9) en el circuito del fondo, junto con los correspondientes límites indicados en la norma IEC 61000-3-2 y los valores medidos para el inversor AEG Protect PV 2800.

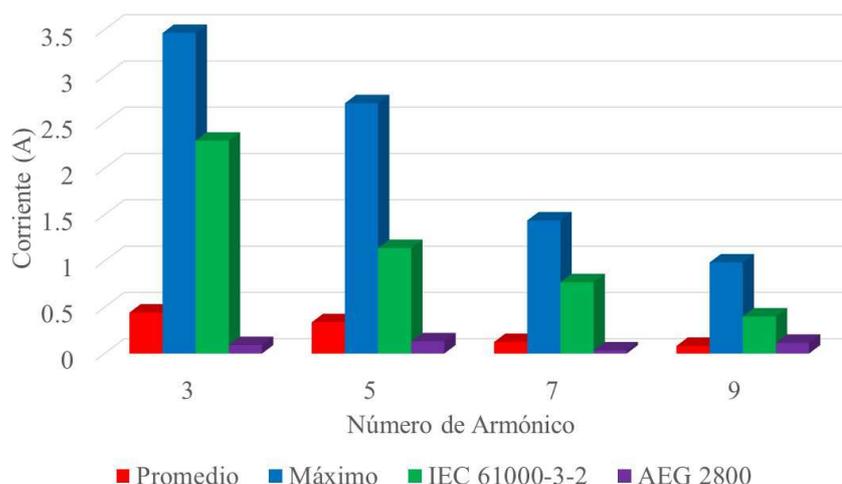


Figura 11: Valores medidos el día 12 de junio de 2016 de los armónicos impares de corriente (promedios y máximos) en el circuito del fondo, límites fijados en IEC 61000-3-2 y valores medidos para el inversor AEG Protect PV 2800.

## CONCLUSIONES

Los posibles efectos de la conexión de sistemas FV a la red de distribución eléctrica pública sobre la calidad del servicio suelen ser una preocupación de las empresas distribuidoras y los entes de regulación. Si bien es conocido a nivel internacional la factibilidad de introducir este tipo de tecnología en la matriz eléctrica con un grado de penetración relativamente importante, contribuyendo incluso a mejorar la calidad del servicio, resulta necesario demostrar en el país, con experiencias concretas, que los inversores FV de conexión a red utilizados por este tipo de sistemas cumplen con los requerimientos de seguridad y calidad de la energía inyectada. A tal fin, el presente trabajo se centró en el estudio de dos casos:

- Evaluación de la distorsión por armónicos en un sistema FV de 40 kW, conectado a la red interna de uno de los edificios del Polo Científico y Tecnológico.
- Comparación de las perturbaciones introducidas a la red por un inversor FV de 2,8 kW con las producidas por las cargas de una vivienda unifamiliar.

Los resultados de las mediciones del factor de potencia, la distorsión armónica total y las componentes armónicas de la corriente del sistema FV de 40 kW permiten afirmar que la conexión de este tipo de sistemas a la red eléctrica no afecta la calidad del servicio. El factor de potencia es prácticamente igual a 1 para potencias inyectadas superiores al 10% de la potencia nominal del inversor. Asimismo, la inyección de armónicos de corriente se encuentra claramente por debajo de los límites establecidos por la norma IEC 61000-3-2 para equipos de hasta 16 A por fase, aun cuando el rango de trabajo del sistema FV compuesto por 2 inversores de 20 kW cada uno excede largamente esta corriente. Los ensayos de desconexión y conexión del sistema FV permitieron demostrar también que la distorsión armónica en tensión en el punto de conexión a la red es independiente de la presencia de este sistema.

Las conclusiones del análisis de la calidad de red en la vivienda unifamiliar tomada como caso de estudio son aún más contundentes. La distorsión armónica en corriente emitida por los equipos existentes en una vivienda, muy especialmente los equipos de aire acondicionado, es significativamente superior (hasta un orden de magnitud) a la inyectada por un inversor FV de conexión a red de potencia tal que genere anualmente aproximadamente la misma energía que la consumida por la vivienda.

En resumen, se puede afirmar que la conexión a la red de distribución eléctrica de baja tensión de sistemas FV basados en inversores de conexión a red, que cumplen con las normas aceptadas internacionalmente, no afectan la calidad del servicio eléctrico en cuanto a armónicos ya que las distorsiones que inyectan a la red son significativamente menores que las inyectadas por las cargas de los usuarios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Juan Carlos Benvenuto y Alejandro Zitzer, de Aldar S.A., empresa que diseñó y ejecutó el proyecto del sistema FV de 40 kW instalado en la terraza del edificio del CONICET. Para la realización de los ensayos en esta instalación, se contó con la ayuda de Gabriel Arturi, Esteban Alvarez y Gabriel Troncoso, del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

Asimismo, agradecen a los integrantes del Departamento Energía Solar de la CNEA y de la Escuela de Ciencia y Tecnología de la UNSAM que participan del proyecto IRESUD y, muy especialmente, a Gabriela I. Durán, quien coordina las cuestiones administrativas, contables y de difusión del proyecto.

## REFERENCIAS

- Ackermann T., Andersson G. y Söder L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power System Research* 57, 195-204.
- Agencia de Noticias San Luis (2014). San Luis inaugura su primer Parque Solar Fotovoltaico, Terrazas del Portezuelo. <http://agenciasanluis.com/notas/2014/10/06/san-luis-inaugura-su-primer-parque-solar-fotovoltaico/>
- CAMMESA (2016). Informe Anual 2015 República Argentina, Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A.. <http://www.cammesa.com/linfoanu.nsf/MINFOANU?OpenFrameSet>
- Eduful G., Jackson E. A. y Cole J. E. (2014). Harmonic emission limits and selecting PCC location based on the type of distribution system. *Proc. World Congress on Engineering 2014 (WCE 2014) Vol I*, London, UK. ISSN: 2078-0966 (Online).
- ENARSA (2016). <http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/areas-de-negocios/92-energiasrenovables/397-genren?showall=&start=1>
- Farrell J. (2016). Questioning Solar Energy Economies of Scale, 2015 Edition [http://www.renewableenergyworld.com/ugc/blogs/2016/02/questioning\\_solaren.html](http://www.renewableenergyworld.com/ugc/blogs/2016/02/questioning_solaren.html)
- Gambetta P. y Doña V. (2011). Planta Solar Fotovoltaica Solar San Juan I: descripción de su diseño y detalles de operación. *Actas del Cuarto Congreso Nacional – Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, HYFUSEN 2011*. [http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen\\_2011/trabajos/11-258.pdf](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/11-258.pdf)
- IEC (2016). IEC 61000-3-2:2014: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase). <https://webstore.iec.ch/publication/4149>
- IRESUD (2016). <http://iresud.com.ar/>
- Laborde M. y Williams R. (2016). Energía Solar, Capítulo 1, “Energía Solar Fotovoltaica”, J. Plá, M.D. Perez, J.C. Durán. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Buenos Aires. <http://www.ancefn.org.ar/biblioteca/libros.html>
- MERCOM (2016). Solar in US Accounted for 26% of New Capacity Addition in 2015. <http://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2016/03/Mercom-Solar.pdf>
- Moller L., Robinson D., Perera S., Gosbell V., Bucca F. (2005). Assessing the impact of increased air conditioner load on power quality in Australia. *Proc. 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*.
- Munsell M. (2016). 5 Trends Shaping the 66GW Global Solar Market. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/5-Trends-Shaping-the-66-GW-Global-Solar-Market>
- Programa RenovAr – Ronda 1 (2016), Subsecretaría de Energías Renovables, Ministerio de Energía y Minería de la Nación. [https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6757/AS\\_14758738851.pdf](https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6757/AS_14758738851.pdf)

REN 21 (2016). “Renewables 2016 - Global Status Report”, informe generado por REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

[www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx](http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx)

Resolución ENRESP N°1315/14, Ley 7824, Salta.

<http://boletinoficialsalta.gob.ar/anexos2/enresp1315-14.pdf>

Resolución EPE N° 442/13, Santa Fe. <http://www.epe.santafe.gov.ar/?resolucion442>

Resolución EPRE N°019/15, Art. 11 Ley 7549, Mendoza. <http://www.epreactivo.org/pages/resolucion>

Statista (2015). Global cumulative solar PV capacity at the end of 2015, by country (in gigawatts). The Statistics Portal. <http://www.statista.com/statistics/264629/existing-solar-pv-capacity-worldwide/>

## ABSTRACT

The possible effects of the connection of photovoltaic (PV) systems to the power grid on service quality, particularly in relation to the injection of harmonic components, are often a concern of distribution companies and regulatory authorities. In order to provide quantitative data on this subject, the power quality was analyzed: (i) in the connection point of a 40 kW PV system installed in the Scientific and Technological Pole, and (ii) in one of the electrical circuits of a house. On one hand, measurements made in the 40 kW PV system allowed to verify that the current harmonic components injected into the network are clearly below the limits set by IEC 61000-3-2. Meanwhile, measurements performed in the electrical circuit of the house show that current harmonic components emitted by household appliances are significantly higher than the harmonics injected by a typical PV power inverter for a house. Therefore, the results presented in this paper support the conclusion that grid-connected PV systems do not affect the power quality in terms of harmonic distortion.

**Keywords:** photovoltaic system, electrical grid, distributed generation, inverter, harmonic distortion, quality.