

Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema

**DETERMINACIÓN DEL IMPACTO DE LA INCLUSIÓN DE PANELES
FOTOVOLTAICOS SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO**

J.L. AGÜERO*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

G. BARBERA
IITREE-FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHERE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

H.G. MAYER
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J. DIAZ
F. INFORMÁTICA UNLP
Argentina

N. CASTRO
F. INFORMÁTICA UNLP
Argentina

Resumen – En la actualidad se observa un crecimiento sostenido de la inserción de fuentes de energía renovable en los sistemas eléctricos. Entre dichas fuentes se encuentran la energía eólica, la solar térmica, y la solar fotovoltaica. Naturalmente, el disparador de tal iniciativa ha sido justamente fortalecer el cuidado del medioambiente, habida cuenta que su inclusión implica, en términos globales, una reducción sustancial de la emisión de gases de efecto invernadero.

En ese sentido, y dentro del marco del proyecto “Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos” (IRESUD), se han instalado paneles fotovoltaicos dentro del predio de la Facultad de Informática de la UNLP. Dicho proyecto ha sido parcialmente subsidiado con Fondos Argentinos Sectoriales (FONARSEC) a través de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCyT). El objeto del mismo es introducir en el país tecnologías asociadas con la interconexión a la red eléctrica, en áreas urbanas y periurbanas, de sistemas solares fotovoltaicos distribuidos, contemplando para ello cuestiones técnicas, económicas, legales y regulatorias.

En cuanto a las características técnicas del generador fotovoltaico instalado, se indica que el mismo cuenta con 72 módulos de 235 Wp cada uno y con 4 convertidores CC-CA (3 x 4600 W y 1 x 2800 W). Por lo tanto, la potencia total del sistema es de 16,6 kWp. La energía generada es inyectada a la red interna de la propia facultad, correspondiendo aproximadamente al 10 % de la total consumida por el establecimiento. La instalación se encuentra en funcionamiento desde el mes de diciembre del año 2013 y en este momento está en etapa de recolección de datos para el posterior análisis y cálculo de su rendimiento.

A fin de evaluar el efecto que la presencia del generador tiene sobre la red preexistente, el IITREE-FI-UNLP realizó mediciones de armónicas normalizadas, tanto en la tensión como en la corriente, justamente en bornes de los paneles y los respectivos convertidores. Adicionalmente, se midió la energía generada e inyectada a la red interna.

En este Trabajo se presenta un análisis completo de las mediciones efectuadas, evaluando el contenido armónico según la hora del día y por lo tanto según la energía generada por los paneles. Se presta particular atención, además, al tipo de día que se trate (laborable o no laborable), dado que esto afecta directamente al consumo global del edificio.

Finalmente, se concluye si la inclusión del generador fotovoltaico tiene – o no – un impacto directo sobre el establecimiento, en materia de Calidad de Servicio Eléctrico.

Palabras clave: ARMÓNICAS – ENERGÍA RENOVABLE – ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA – CALIDAD DEL SERVICIO – PANEL FOTOVOLTAICO.

1 INTRODUCCIÓN

Por solicitud de las autoridades de la Facultad de Informática de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), desde el 25 de Febrero hasta el 9 de Marzo de 2014 inclusive, el Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE) realizó mediciones de la Calidad del Servicio Eléctrico a la salida de un sistema de alimentación conformado por paneles fotovoltaicos y convertidores, que opera en paralelo con la red pública de baja tensión.

Se trata de un conjunto de paneles fotovoltaicos con los que se pretende generar aproximadamente el 10 % de la energía mensual que se utiliza en el edificio de la Facultad de Informática. Están compuestos por módulos de silicio mono-cristalino de origen italiano formados por 60 celdas de aproximadamente 1,7 metros de alto por 1 metro de ancho. En total, los 72 paneles generan una potencia aproximada de 17 kWp (kilowatt pico). Cada uno produce 235 Wp, con una Tensión de Circuito Abierto de 33 V y una Corriente de Cortocircuito de 8,5 A, y se encuentran distribuidos en 6 ramas de 10 módulos y 1 rama de 12. Estos paneles están vinculados a un conjunto de cuatro convertidores monofásicos (3x4,6 kW y 1x2,8 kW) conectados en estrella al sistema trifásico donde ingresa la red de distribución pública en baja tensión.

Los convertidores son del tipo comercial y están diseñados para este tipo de aplicaciones específicas. Una de las características de los mismos es que “monitorean continuamente la tensión y frecuencia de la red, y en caso de que exista un fallo en la red que haga que la tensión o la frecuencia estén fuera de rango permitido, de manera inmediata desconectan el sistema automáticamente. En el caso de desaparecer completamente la tensión de red, los convertidores disponen de una protección anti-isla, que desconecta el sistema hasta que detecta de nuevo tensión, la reconexión se produce a pocos minutos de la desaparición del fallo de tensión o frecuencia” [1].

2 MEDICIONES REALIZADAS

La Figura 1 muestra los paneles fotovoltaicos instalados en el edificio de la Facultad de Informática de la UNLP mientras que la Figura 2 presenta un diagrama unifilar simplificado de la interconexión de los paneles fotovoltaicos con el convertidor, la red pública y el registrador de Calidad de Servicio colocado para realizar las mediciones.



Figura 1. Disposición física los paneles fotovoltaicos.

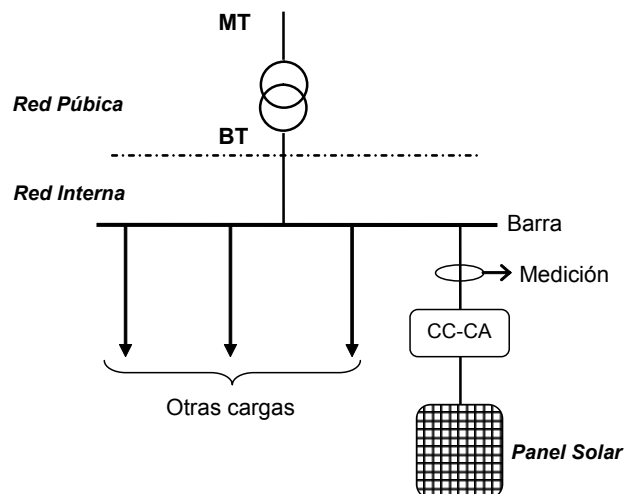


Figura 2. Esquema del sistema eléctrico. Punto de conexión del equipo de medición de Calidad de Servicio.

Básicamente, la metodología de medición consistió en la instalación de un equipo registrador de Calidad de Servicio Eléctrico a la salida del conjunto de convertidores, midiendo corrientes y tensiones en las tres fases.

Como se aprecia en Figura 2, el equipo registrador fue conectado a la salida de corriente alterna de cada fase donde están conectados los convertidores. Se midieron las tensiones y corrientes de fase con sus respectivas componentes armónicas. Los valores de los parámetros medidos fueron registrados cada 10 minutos (medición normalizada según [2] para registro de armónicas).

Cercana a los paneles fotovoltaicos se ha instalado una Estación Meteorológica que, entre otras magnitudes, mide la Radiación Solar [W/m^2]. La Figura 3 muestra la Radiación Solar medida durante el período de evaluación de la Calidad de Servicio, esto es desde el 25 de febrero al 9 de marzo de 2014 inclusive. Notar que ambos gráficos mostrados en Figura 3 tienen diferentes escalas para la Radiación Solar. Las variaciones “bruscas” de amplitud se deben a cambios de nublado a soleado. Observar que 7 y 8 de marzo corresponden a días completamente soleados, y que en la mañana se produce una caída de la Radiación Solar recibida debido a la sombra provocada por una torre empleada para telefonía celular.

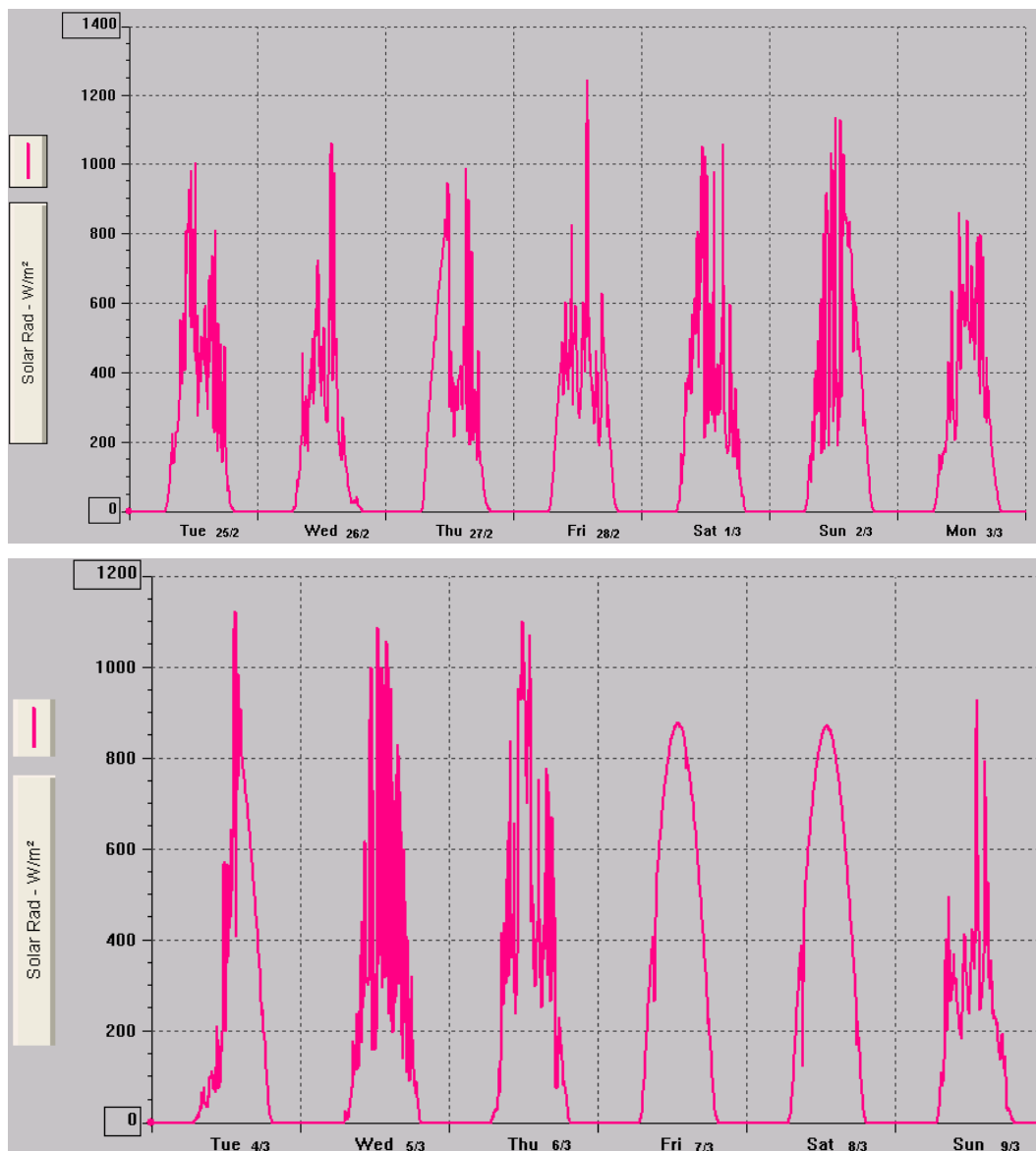


Figura 3. Radiación solar medida por Estación Meteorológica.

En Figura 4 se muestran los registros obtenidos de corriente eficaz en cada una de las tres fases. Puede observarse que la fase T presenta valores algo mayores que las otras dos durante los períodos de funcionamiento del sistema de generación fotovoltaico. Esto es debido a que en dicha fase se encuentran

conectados dos convertidores, uno de 4600 W y otro de 2800 W, mientras que en cada una de las otras dos fases sólo hay un convertidos de 4600 W.

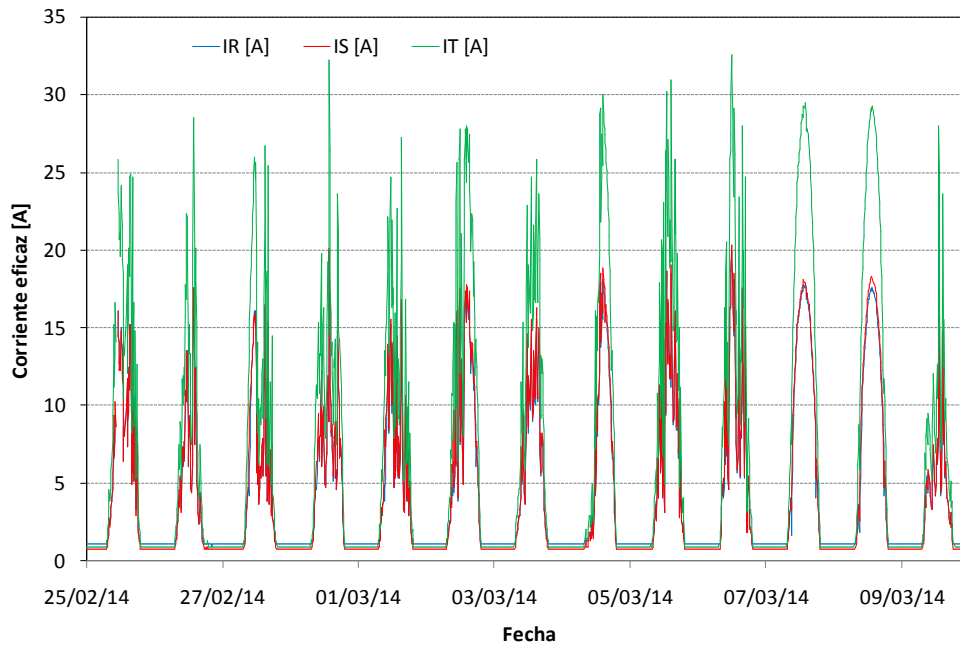


Figura 4. Corriente eficaz. Fases R, S, T.

En lo que respecta a la tensión, la Figura 5 muestra las gráficas de las tensiones de fase en cada una de las tres fases observadas.

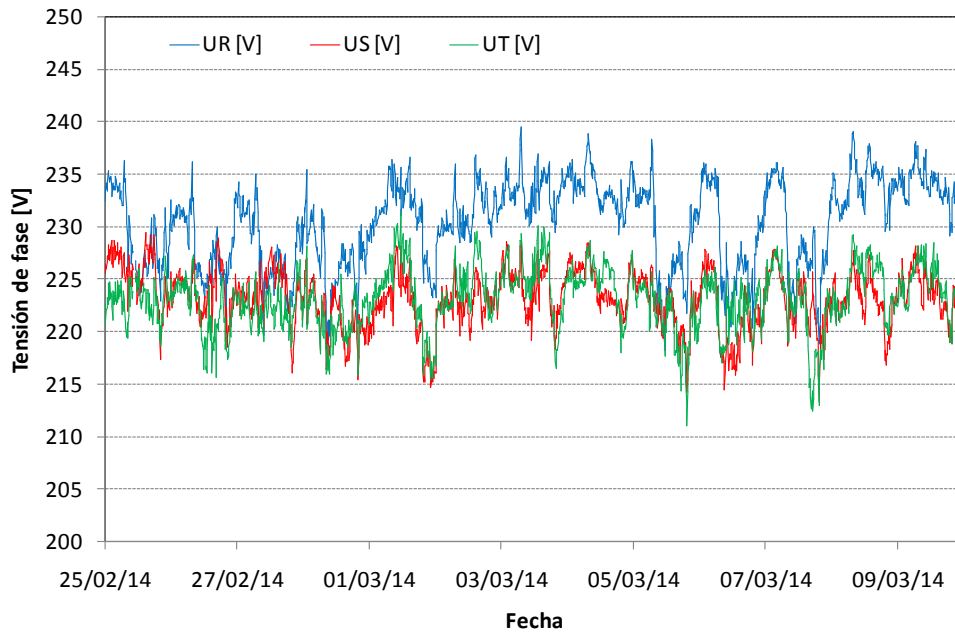


Figura 5. Tensión eficaz. Fases R, S, T.

En Figura 4 se observa que la corriente de los días 7 y 8 de marzo no presenta cambios “abruptos” debido a que ambos días fueron soleados, tal como se observa en Figura 3.

Por tratarse de un punto de acoplamiento común entre la red interna del edificio y la red pública, los perfiles de tensión presentan idénticas características a las que pudieran observarse en cualquier punto de la red de distribución en las inmediaciones del edificio de la Facultad de Informática. En Figura 5 puede verse que los valores se encuentran en torno al valor nominal de 220 V pero la tensión sobre la fase R registró valores superiores a los medidos en las otras dos fases, y que en la mayor parte de período de medición superó los 231 V, valor máximo admitido por la normativa del ENRE para redes subterráneas de baja tensión. Por otra parte, los valores medidos se encuentran dentro de los límites actuales de $\pm 8\%$ para zonas no rurales,

regulados por el Organismo de Control de la Energía Eléctrica de la Provincia de Buenos Aires (OCEBA) [3]. Cabe aclarar que las mediciones normalizadas de nivel de tensión suelen tener una cadencia de 15 minutos y no de 10 como en este caso.

Dentro de los parámetros registrados se encuentra la distorsión armónica total, también llamada THD por sus siglas en inglés (*Total Harmonic Distortion*). La Figura 6 muestra los valores de THD registrados en la tensión, en cada una de las fases, durante el período de observación.

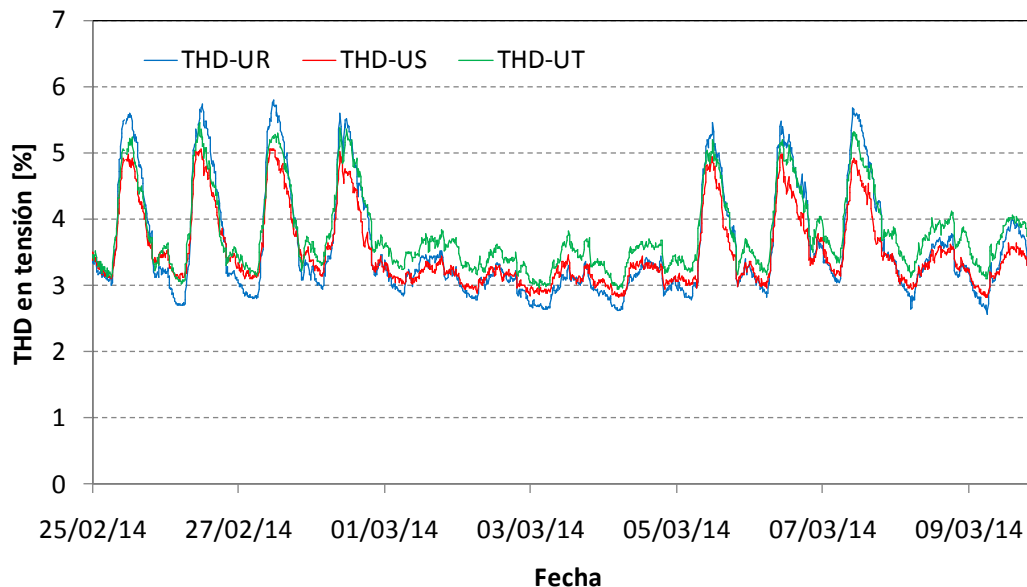


Figura 6. Distorsión armónica total en la tensión. Fases R, S, T.

Como puede observarse en la Figura 6, los valores de THD en la tensión fueron inferiores al 6 % en todos los casos, cayendo alrededor del 3 % en los períodos correspondientes a días no laborables. Estos valores, se encuentran por debajo de los niveles exigidos por la normativa del ENRE en la Argentina (8 %).

Se estima que las causantes de la distorsión en la tensión son mayoritariamente las cargas no lineales existentes en el propio establecimiento (computadoras personales, lámparas fluorescentes compactas; etc.) ya que éstas no operaron los días no laborables, mientras que los paneles fotovoltaicos sí.

Profundizando en el análisis armónico y seleccionando algunas armónicas típicas presentes en los sistemas eléctricos, en las Figuras 7 a 9 puede verse la gráfica de los valores registrados de las armónicas de tensión 3, 5, 7, 9 y 11 para cada una de las tres fases.

Se aprecia que las armónicas 3 y 5 presentaron un comportamiento enteramente similar al observado antes en el caso del THD, y claramente son las componentes que dieron origen a tales valores de este parámetro.

A pesar de que las armónicas 3 y 5 son sustancialmente mayores a las otras consideradas, los valores obtenidos se encuadran dentro de los límites que el ENRE impone para las áreas bajo su control.

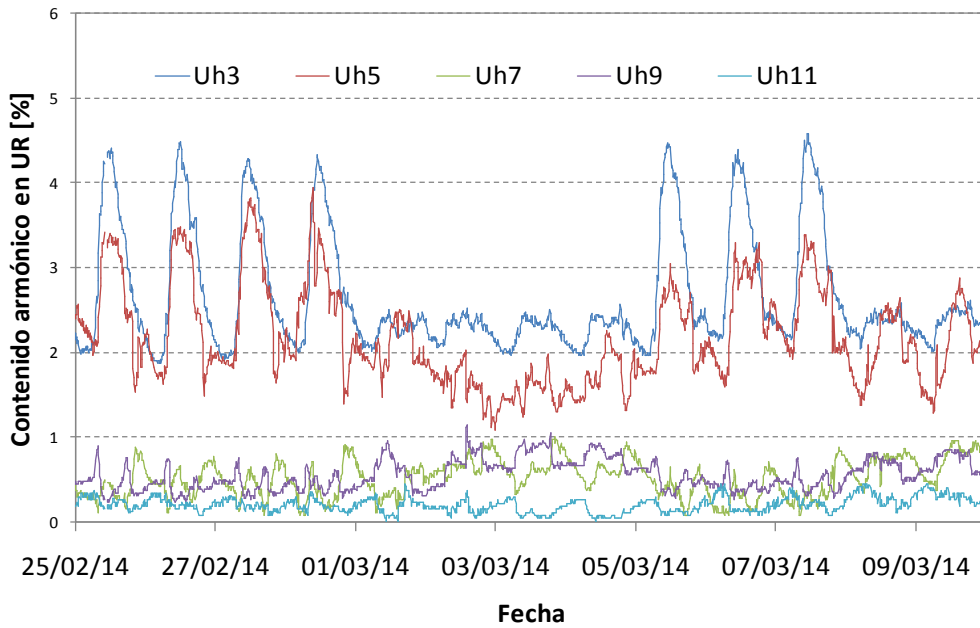


Figura 7. Armónicas de tensión individuales para la fase R.

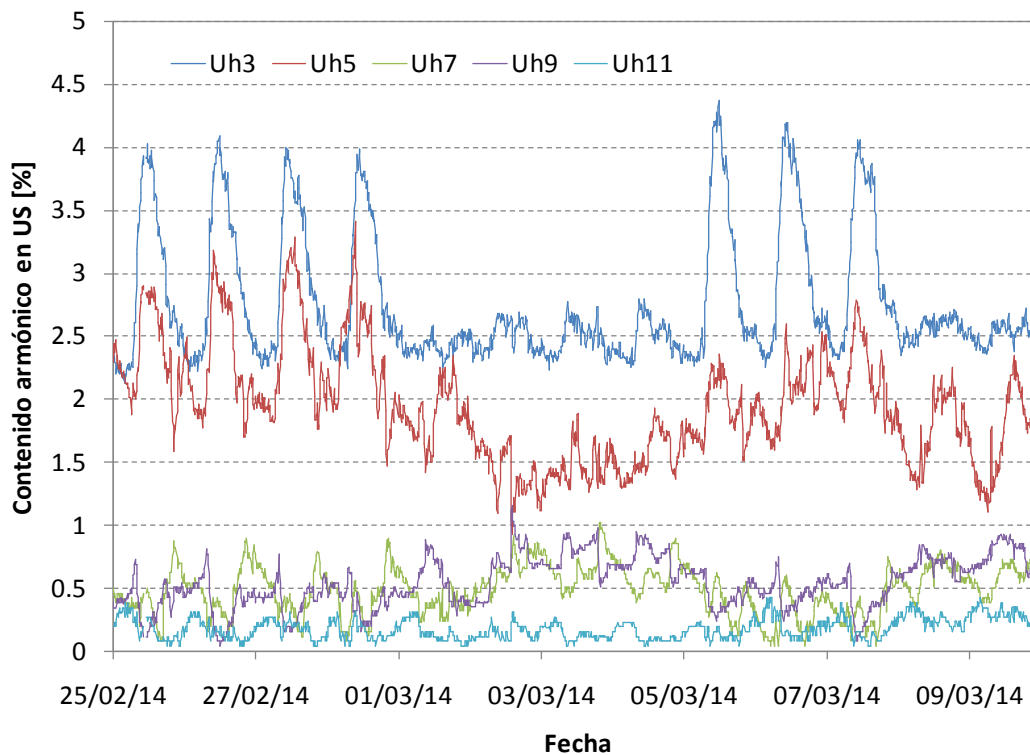


Figura 8. Armónicas de tensión individuales para la fase S.

Análogamente a lo realizado para las tensiones, se obtuvo la grafica de Figura 10, donde se representa la distorsión armónica total en la corriente generada por los convertidores para cada una de las fases. Se observa que los valores de distorsión total en corriente son bajos (alrededor del 5 %) durante los periodos en los que el sistema de generación fotovoltaica se encontró en funcionamiento (de 7 a 19 hs). Por otra parte, los valores altos de distorsión (alrededor del 20 %) se dieron durante los periodos en los que el sistema de generación fotovoltaica estuvo fuera de servicio (sin inyectar corriente) y por lo tanto es error de medición.

Asimismo, los altos valores de THD en la corriente, por encima del 20 %, se debieron a los arranques y paradas (a la mañana y a la noche, respectivamente) de los convertidores.

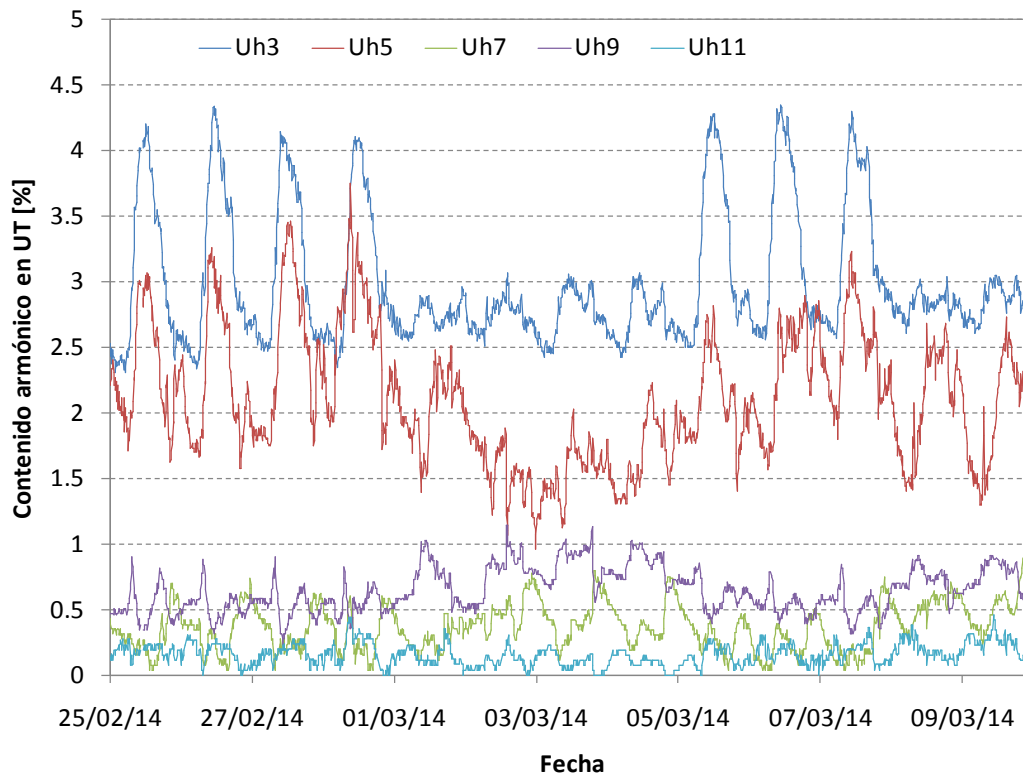


Figura 9. Armónicas de tensión individuales para la fase T.

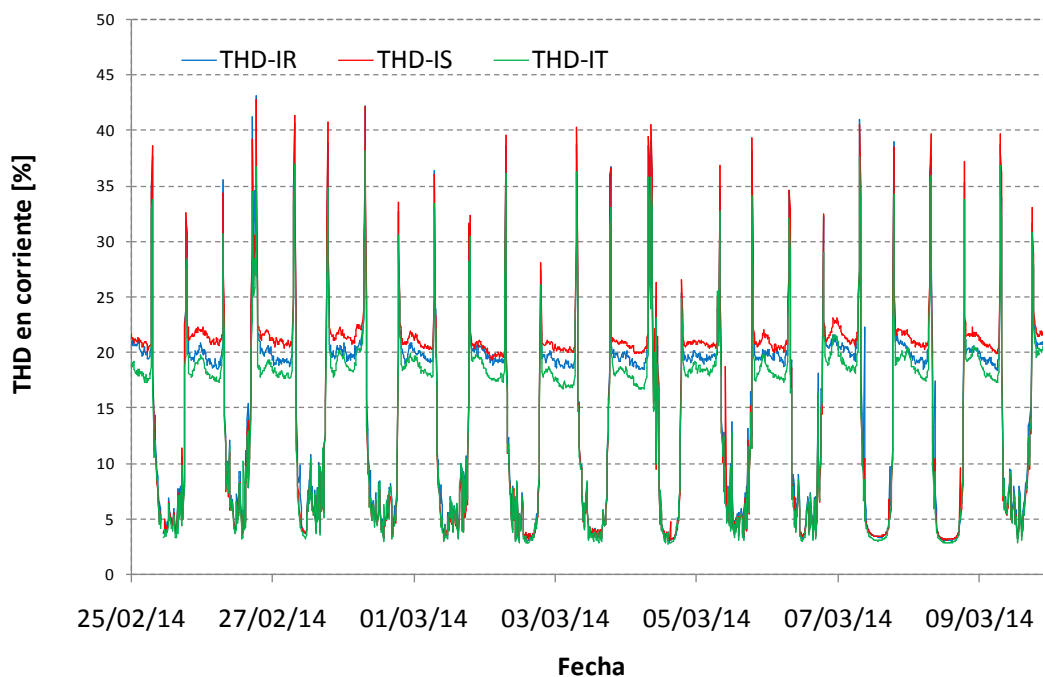


Figura 10. Distorsión armónica total en la corriente de las fases R, S, T.

En Tabla I se resumen los valores de nivel de tensión obtenidos y se comparan con los límites establecidos por el ENRE y aquellos impuestos por OCEBA.

Los valores registrados son expresados como el percentil P_{95} , es decir como el valor de tensión que no es superado en más del 5 % del período de medición de una semana, aunque no se corresponda con una medición normalizada (de registros cada 15 minutos) como lo estipula el ENRE.

En Tabla II se exponen los valores de percentil P_{95} de las armónicas de tensión consideradas anteriormente junto con sus límites asignados por el ENRE para redes de distribución en baja tensión, sólo a fines comparativos. En todos los casos los valores se refieren al valor de la componente fundamental de la tensión.

Tabla I – Valores obtenidos en la medición y límites ENRE [2] y OCEBA [3].

Fase	Valores medidos [V]	Límites OCEBA	Límites ENRE
R	235	220 V ± 8 % = 202.4 V - 237.6 V (220 V ± 12 % en zonas rurales)	220 V ± 5 % = 209 V - 231 V (Red subterránea)
S	228		220 V ± 8% = 202.4 V - 237.6 V (Red aérea)
T	228		(220 V ± 10% en zonas rurales)V

Tabla II – Valores registrados de armónicas en tensión y límites ENRE.

Armónica	Valor P ₉₅ del registrado [%]			Límite ENRE [%]
	Fase R	Fase S	Fase T	
U ₃	4.2	3.9	4.1	5
U ₅	3.4	2.8	3.0	6
U ₇	0.9	0.8	0.7	5
U ₉	0.9	0.9	0.9	1.5
U ₁₁	0.4	0.3	0.3	3.5

En Tabla II puede verse que para las tensiones se cumple el conjunto de límites establecidos por el ENRE, los cuales son similares a los límites utilizados internacionalmente.

En cuanto a las corrientes cabe destacar que se midieron aquellas generadas por los convertidores y no las inyectadas a la red pública. En general, la distorsión en la corriente, será admisible en la medida que se mantenga acotada la distorsión en la tensión. Es decir que, si bien existen límites de emisión de armónicas en corriente, el impacto será más tolerable en la medida en que la red tenga suficiente potencia de cortocircuito.

3 CONCLUSIONES

En cuanto al impacto de las perturbaciones generadas por los paneles fotovoltaicos en la forma de onda de la tensión en la red interna se concluye lo siguiente:

- **Nivel de Tensión.** Para redes del tipo aéreo, la reglamentación Argentina indica que el Nivel de Tensión a 50 Hz debe encontrarse dentro de ± 8 % de su valor nominal, esto es 220 V, durante al menos el 97 % del tiempo. En valores absolutos, esto implica un valor mínimo de 202,4 V y uno máximo de 237,6 V. De acuerdo a lo registrado, se observaron sólo leves transgresiones de estos valores.
- **Armónicas de tensión.** Para redes de baja tensión, el valor del THD permitido es 8 %. Este valor debe ser cumplido durante al menos el 95 % del tiempo. Respecto a la medición de la distorsión de tensión es posible obtener las siguientes conclusiones:
 - 1) Las mediciones indicaron que el THD se encontró siempre por debajo del 6 % durante el período de registro.
 - 2) En los días laborables la distorsión de tensión fue sensiblemente mayor debido al aporte de las cargas distorsionantes (computadoras y sistemas de iluminación) que no funcionan los días no laborables.
 - 3) En los días no laborables la distorsión de tensión fue cercana al 3 %. Estos valores de distorsión de tensión son debidos mayoritariamente a los convertidores asociados a los paneles fotovoltaicos y a la propia distorsión de la red pública.

Por lo tanto, en líneas generales, se concluye que la Calidad del Servicio Eléctrico de la instalación no es degradada por la presencia de los paneles fotovoltaicos.

Se destaca que el avance en el desarrollo tecnológico de las celdas fotovoltaicas ha sido acompañado por un desarrollo importante en la electrónica de potencia, similar a lo ocurrido en los sistemas de generación eólica.

A través de las mediciones realizadas fue posible observar que resulta totalmente factible la interconexión de las redes públicas de baja tensión con los sistemas distribuidos de generación, como es el caso de generación fotovoltaica, sin deteriorar la Calidad de Servicio del sistema. Por otra parte, los sistemas electrónicos para realizar la interconexión no solo constan de convertidores de potencia sino que poseen sistemas elaborados de control que permiten efectuar análisis y correcciones del sistema controlado para adaptarse a la dinámica de la red y a las modalidades de consumo de los usuarios.

Por otro lado, como sucede en otros países del mundo, primero se debería trabajar sobre la legislación para que este tipo de fuentes de energía puedan ser conectadas a las redes sin riesgos ni problemas adicionales y posibilitando que los usuarios finales puedan comercializar la energía “limpia” excedente que generen. A tal fin ya existen, y se utilizan en diversos países, los medidores de energía bidireccionales.

Desde el punto de vista del sistema eléctrico en general, un factor importante a considerar para las energías renovables, como es el caso de la energía solar fotovoltaica, es su variabilidad. Por lo tanto, resulta importante el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía.

4 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *“Centrales de Energías Renovables: Generación de Electricidad con Energías Renovables”*. Carta González, José; Calero Pérez, Roque; Colmenar Santos, Antonio; Alonso Castro Gil, Manuel - Pearson Educación, S.A., Madrid, 2009. ISBN: 978-84-832-2227-0.
- [2] *“Anexo a la Resolución ENRE 184/00. Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”*. Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), 2000.
- [3] *“Modelo de contrato de concesión municipal de distribución - Subanexo D - Normas de calidad de servicio público y sanciones”*. OCEBA.