

## **EXPERIENCIAS EN LA INCORPORACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESTABLECIMIENTOS DE BAJA TENSIÓN**

J.L. Agüero<sup>1</sup>, G. Barbera<sup>1</sup>, F. Issouribehere<sup>1</sup>, H.G. Mayer<sup>1</sup>, J. Díaz<sup>2</sup>, N. Castro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE) – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. E-mail: [gbarbera@iitree-unlp.org.ar](mailto:gbarbera@iitree-unlp.org.ar)

<sup>2</sup>Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata. E-mail: [ncastro@isis.unlp.edu.ar](mailto:ncastro@isis.unlp.edu.ar)

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

**RESUMEN:** A fin de evaluar el efecto que la presencia del generador tiene sobre la red preexistente, se realizaron 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, como así también el Nivel de Tensión en la barra.

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 conforme a 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.

### **INTRODUCCION**

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.

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.

Con el objeto de evaluar cómo la incorporación de tal generador afecta a la Calidad del Servicio Eléctrico del establecimiento, se realizaron mediciones a la salida del sistema de alimentación conformado por los paneles fotovoltaicos y los correspondientes convertidores DC-AC (corriente continua – corriente alterna), requeridos para que puedan operar en paralelo con la red interna de baja tensión alterna del edificio.

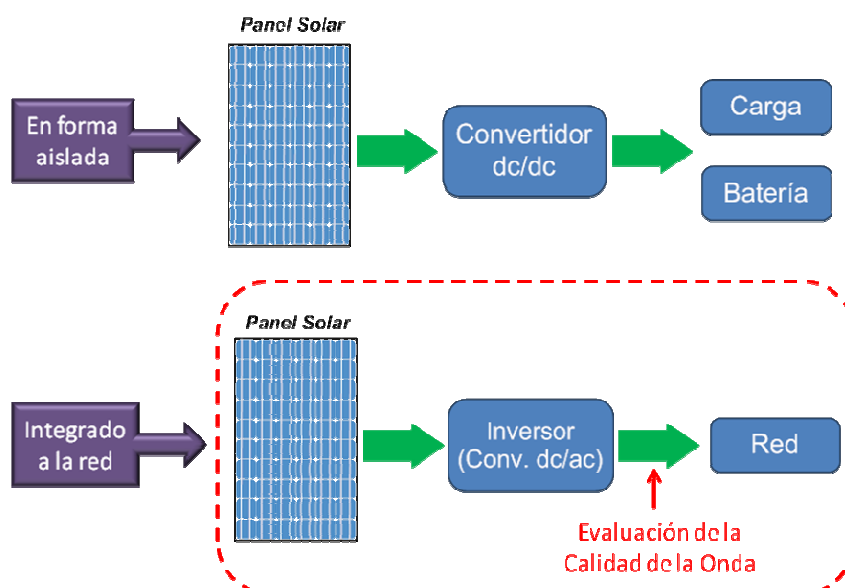
## DESCRIPCIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

El arreglo consta de 72 módulos, de 1,7 metros de alto por 1 metro de ancho, de silicio monocristalino de origen italiano, conformados cada uno de ellos por 60 celdas. En total, los 72 módulos 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 (20 se encuentran conectados a la fase R, 20 a la fase S y 32 a la fase T). En la Fig. 1 se muestra una fotografía general de los paneles, instalados en la terraza de la Facultad.



**Figura 1.** Fotografía de los paneles, en la terraza de la Facultad.

En términos generales, existen dos topologías para la utilización de la energía generada por un panel fotovoltaico. En una de ellas, la energía es empleada para alimentar una carga aislada de la red, la que puede requerir directamente corriente continua (DC); mientras que en la restante, la energía generada se integra a una red de corriente alterna (AC) preexistente. Para ello, es menester incluir convertidores DC-AC. Sendas topologías se esquematizan en la Fig. 2.



**Figura 2.** Topologías normalmente empleadas.

En este caso particular, los 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.

Dado que el proceso de conversión de tensión continua a alterna se implementa por medio de electrónica de potencia, la tensión generada puede contener armónicas, en lugar de ser una señal senoidal pura. Esto fue justamente lo que motivó a evaluar en detalle la Calidad de la Onda provista por el generador.

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].

### MEDICIONES REALIZADAS

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de las mediciones fue determinar si la inclusión de los paneles, más precisamente de los convertidores asociados, afectaba la calidad de la tensión en la barra interna de la Facultad. Para el caso particular de las armónicas, éstas son generadas por los convertidores e inyectadas en la red interna. Dependiendo de su nivel y de la impedancia de la red, podría distorsionarse la tensión de la barra, afectando así a eventuales cargas sensibles presentes en la instalación. Este concepto, se esquematiza en la Fig. 3.

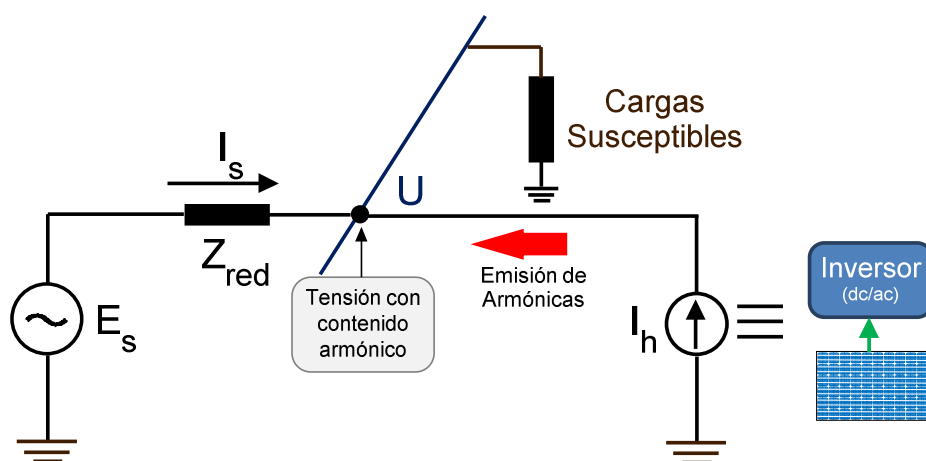
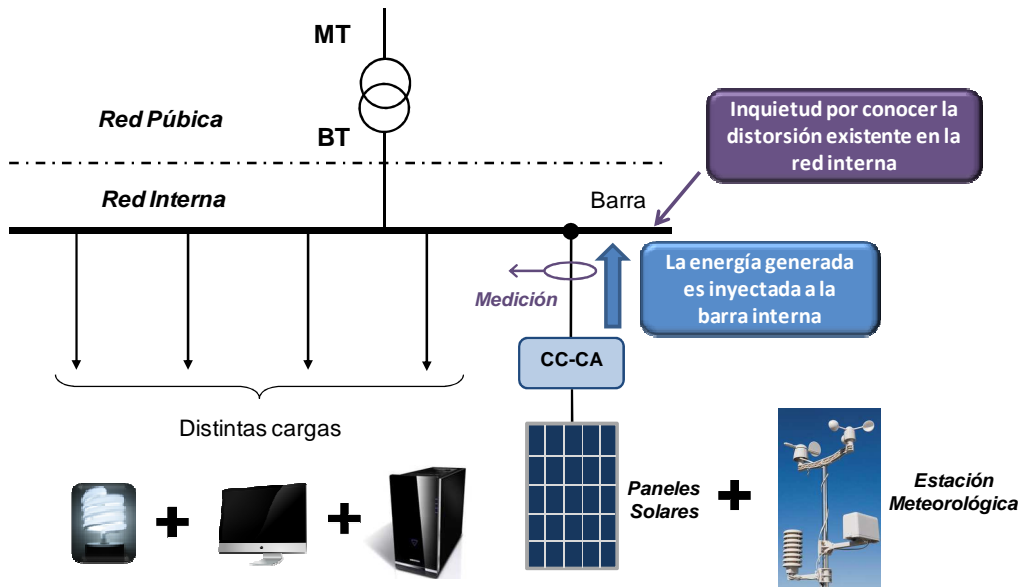


Figura 3. Modelo de emisión de armónicas.

La Fig. 4 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 (CS) colocado para realizar las mediciones. Se destaca que las principales cargas del edificio con computadoras, servidores e iluminación del tipo fluorescente compacta.

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 Fig. 4, 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).

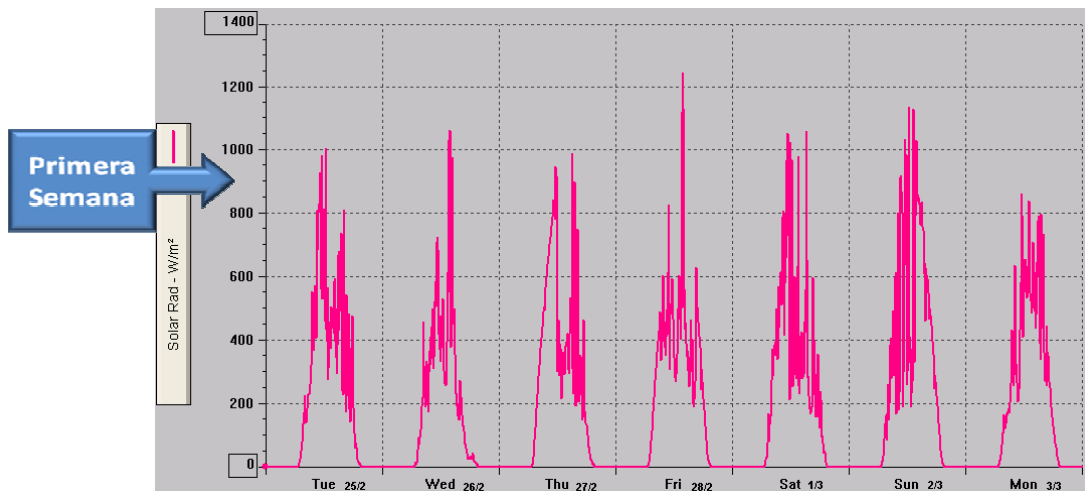


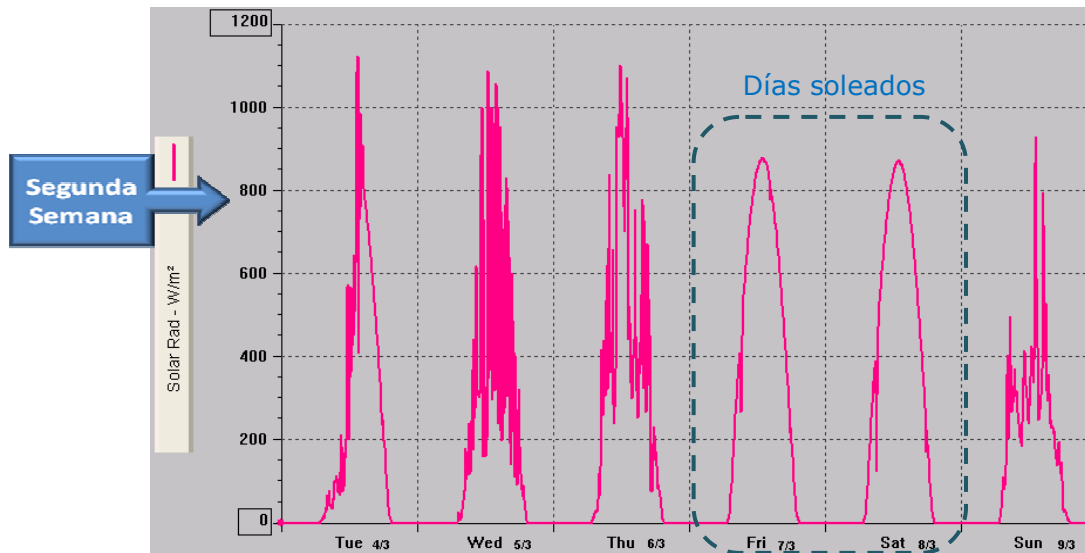
**Figura 4.** Esquema del sistema eléctrico. Punto de conexión del equipo de medición de CS.

Cercana a los paneles fotovoltaicos se ha instalado una Estación Meteorológica que, entre otras magnitudes, mide la Radiación Solar [W/m<sup>2</sup>].

La Fig. 5 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.

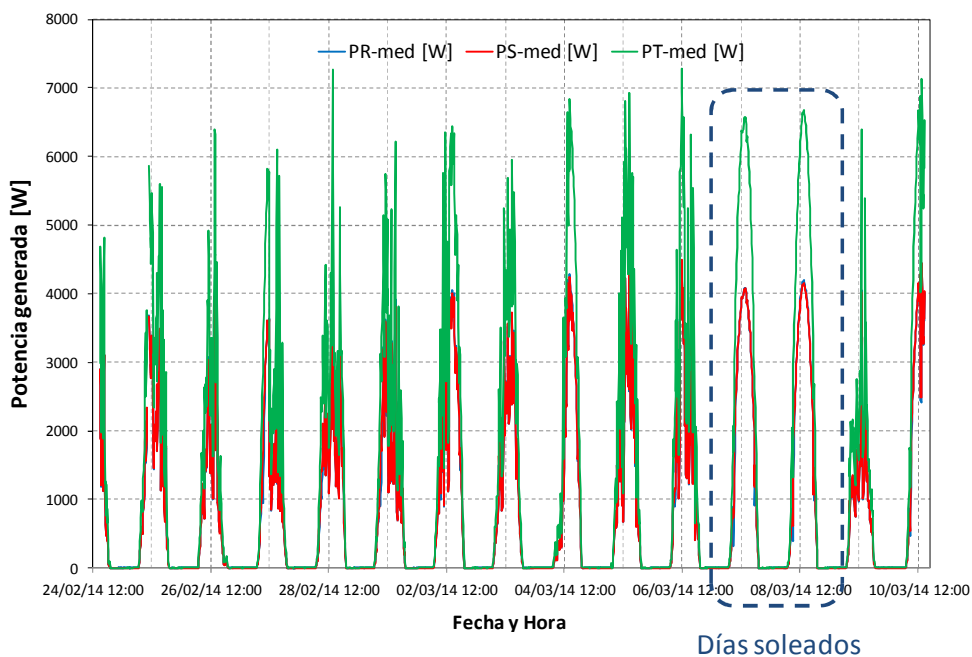
Notar que ambos gráficos mostrados en la Fig. 5 tienen diferentes escalas para la Radiación Solar. Las variaciones “bruscas” de amplitud se deben a cambios de nublado a soleado. Observar además que los días 7 y 8 de marzo correspondieron a días completamente soleados, y que durante la mañana se produjo una caída de la Radiación Solar recibida debido a la sombra provocada por una torre empleada para telefonía celular.





**Figura 5.** Radiación solar medida por Estación Meteorológica.

En la Fig. 6 se muestran los registros obtenidos de potencia activa generada 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, tal como se dijo anteriormente, 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.

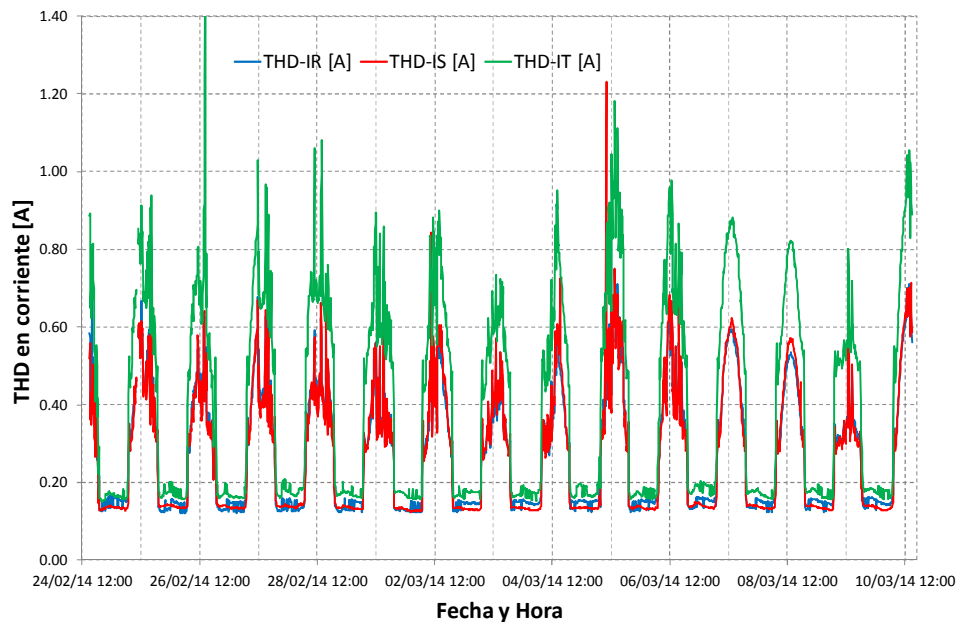


**Figura 6.** Medición de potencia activa.

En la Fig. 6 se observa que la potencia generada los días 7 y 8 de marzo no presenta cambios “abruptos” debido a que ambos días fueron soleados, tal como se mencionó en la Fig. 5.

En cuanto a la evaluación de armónicas por parte del generador fotovoltaico, se midió la Tasa de Distorsión Total, más conocida como **THD** por sus siglas en inglés (*Total Harmonic Distortion*). Este indicador pondera el contenido global de armónicas hasta la componente 40ª.

En la Fig. 7 aparece el perfil de THD en la corriente, para las tres fases, expresado directamente en [A].

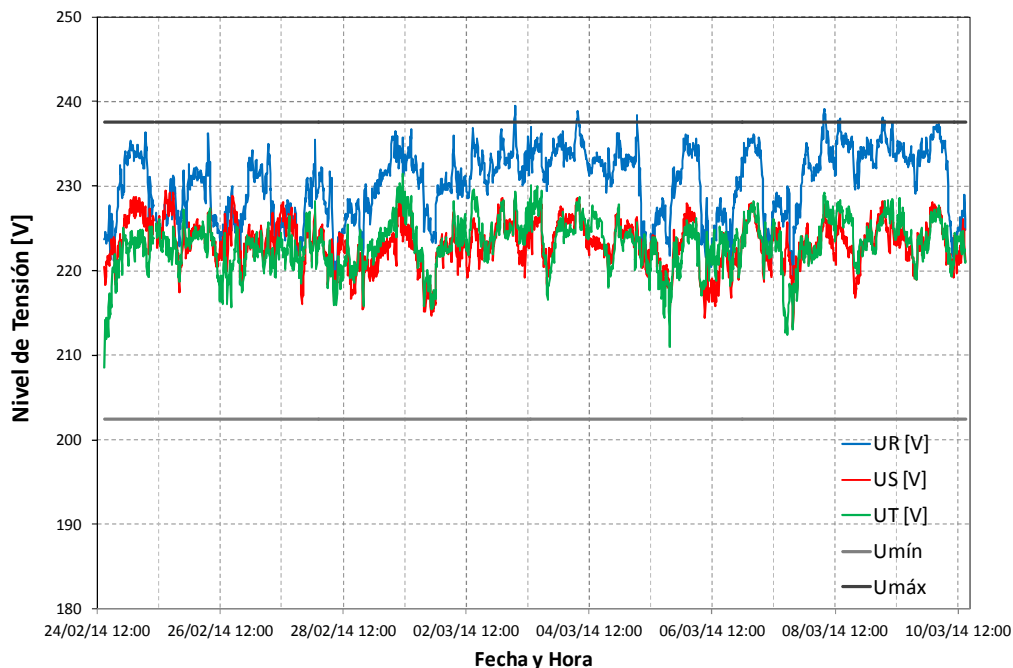


**Figura 7.** Medición de distorsión de corriente.

Como era de esperar, el contenido armónico inyectado en la barra interna de la red de baja tensión aumenta a medida que lo hace la potencia generada por los paneles fotovoltaicos.

De todos modos, la mayor inquietud era conocer el impacto que tiene la inclusión del panel sobre la tensión de la barra que alimenta a las demás cargas (ver Fig. 4). Más precisamente, se procuraba determinar el Nivel de Tensión y su distorsión armónica.

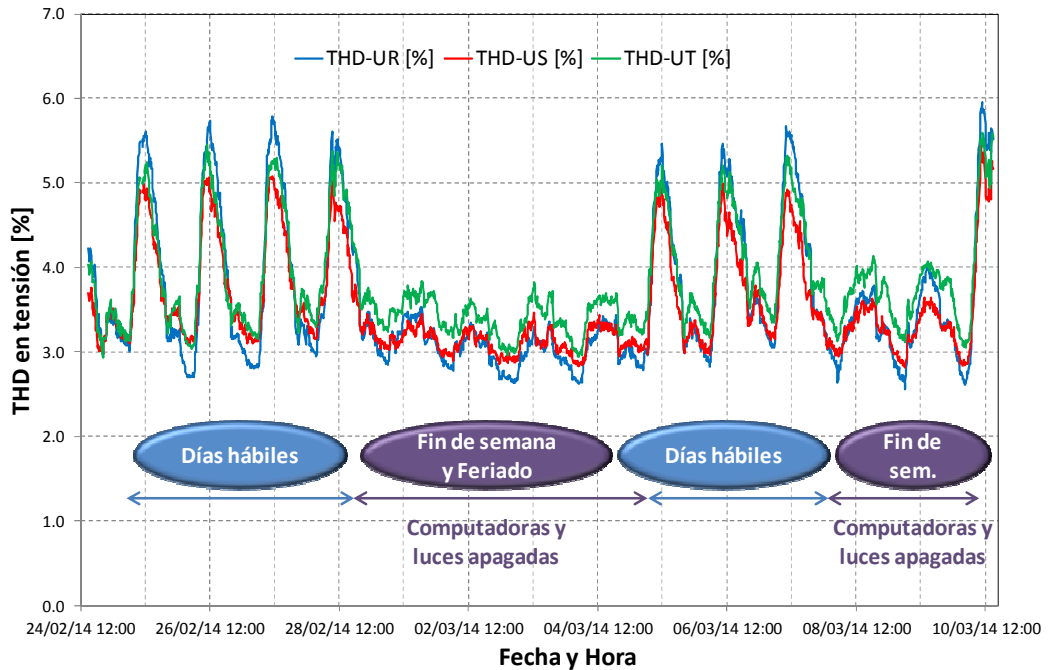
En lo que respecta al Nivel de Tensión, la Fig. 8 muestra las gráficas de las tensiones de fase en cada una de las tres fases observadas, como así también los valores mínimos y máximos permitidos según la regulación argentina ( $\pm 8\%$  de valor nominal), para este parámetro.



**Figura 8.** Tensión eficaz en la barra interna. Fases R, S, T.

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. Se presentan ligeras transgresiones debido a alta tensión. Generalmente, se permite la transgresión de los límites hasta durante un 3% de la duración de la medición; en este caso la transgresión se dio durante el 1%.

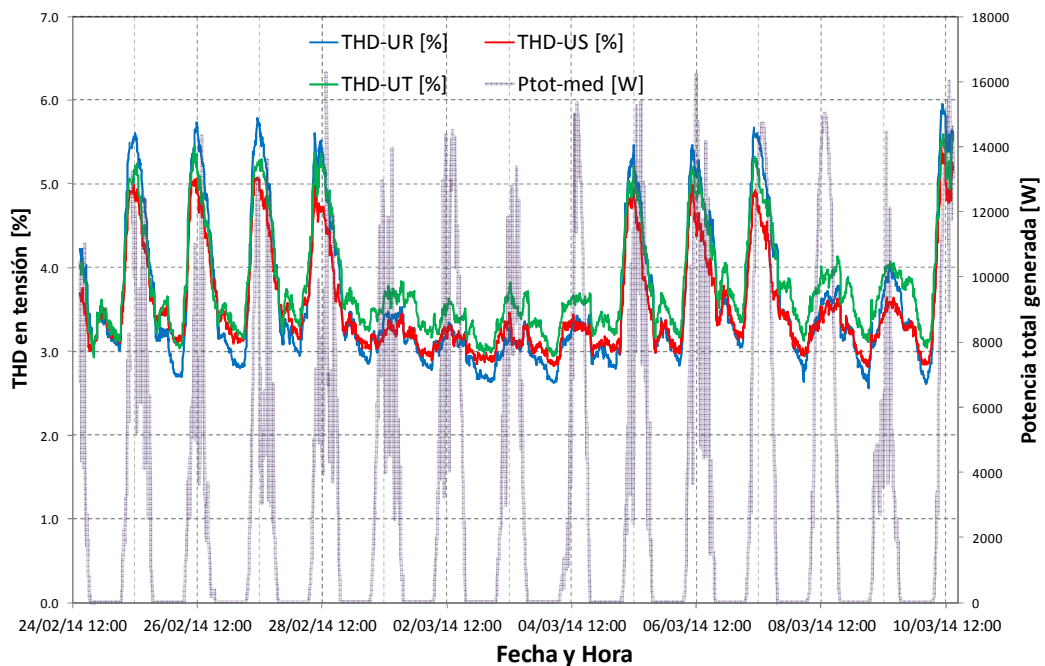
Por otro lado, la Fig. 9 muestra los valores de THD (relativos a la componente fundamental) registrados en la tensión, en cada una de las fases, durante el período de observación. En la figura se ha destacado cuáles fueron días hábiles y cuáles feriados y fines de semana, habida cuenta que la carga presente en el establecimiento depende sensiblemente de qué tipo de día se trate.



**Figura 9.** Distorsión armónica total en la tensión. Fases R, S, T.

Como puede observarse en la Fig. 9, 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 encontraron por debajo de los niveles exigidos por la normativa del ENRE en la Argentina (8 %) para redes de baja tensión.

Con el objeto de determinar cómo afecta la potencia generada por los paneles fotovoltaicos a este particular comportamiento de la distorsión en la tensión, en la Fig. 10 se presentan, en un mismo gráfico los perfiles de THD U [%] y Potencia generada [W].

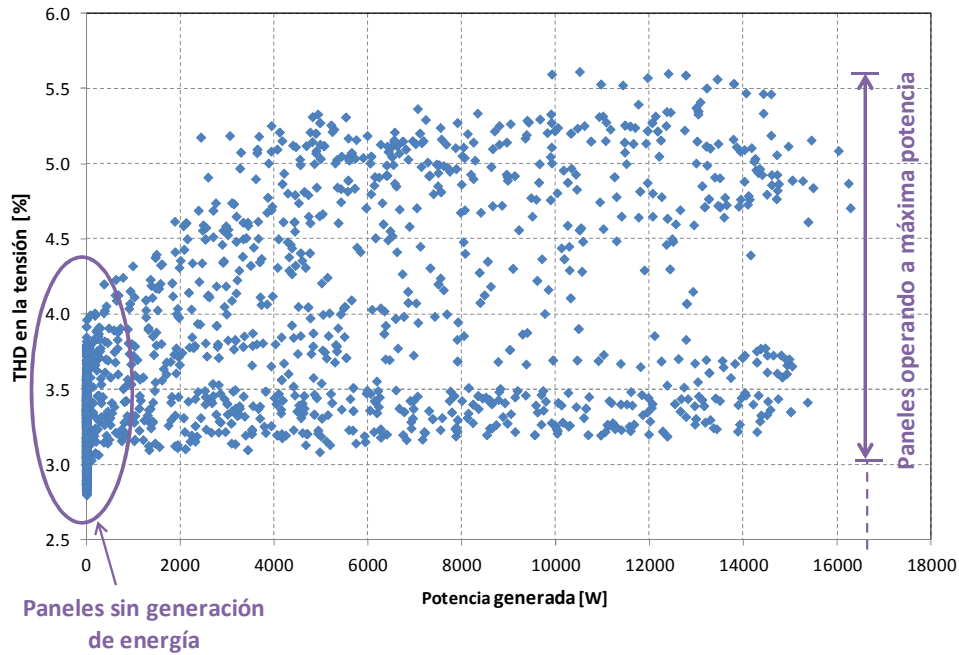


**Figura 10.** Perfiles de distorsión de tensión y de potencia.

A simple vista se vislumbra que mientras la potencia generada por los paneles fue del mismo orden durante los días laborables y los fines de semana y feriados, la distorsión armónica en la tensión se redujo sensiblemente durante estos últimos.

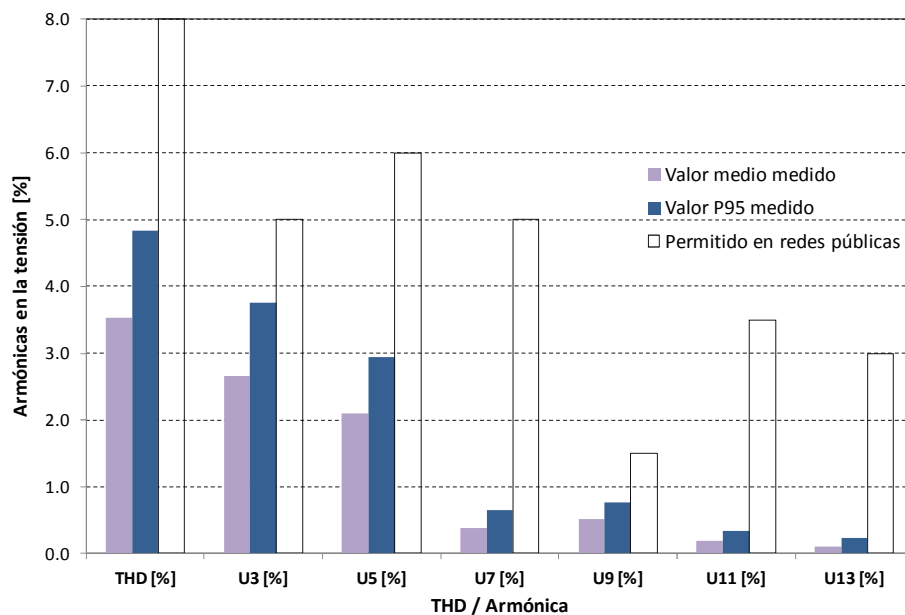
Naturalmente, dado que los valores más elevados de distorsión en la tensión se presentaron los días laborables, podría concluirse que la misma se debería tanto a las propias cargas no lineales existentes en la Facultad (computadoras, sistemas de iluminación; etc), como a lo proveniente de la red externa.

A fin de confirmar este razonamiento, en la Fig. 11 se presenta un gráfico de correlación entre Potencia generada [W] (en el eje de abscisas) y THDU [%] (en el eje de ordenadas). En éste se observa una reducida vinculación entre sendos parámetros; de hecho, para valores de potencia cercanos al nominal, se presentan valores de THDU [%] que varían entre 3 y 5,5; lo cual implicaría que la distorsión proviene de otra fuente de armónicas y no de los convertidores.



**Figura 11.** Correlación entre potencia y distorsión de tensión.

En cuanto a las armónicas individuales que aportaron al THDU [%], éstas fueron básicamente las impares hasta la 13<sup>a</sup>, lo cual es típico de cargas que contienen convertidores electrónicos.



**Figura 12.** Armónicas individuales en la tensión.



En el gráfico de barras de la Fig. 12 se muestran los valores medidos – representados por su valor medio y por su P95 (valor superado durante sólo el 5 % de los períodos de 10’ que componen la medición) – como así también los Niveles de Referencia existentes en Argentina para redes públicas de baja tensión.

Se aprecia que en todos los casos los niveles medidos se encontraron por debajo de los de referencia.

## 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  $\pm 8 \%$  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 THDU 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 fines de semana y feriados.
    - 3) En los días no laborables la distorsión de tensión fue cercana al 3 %. Estos valores de distorsión de tensión son debidos a los convertidores asociados a los paneles fotovoltaicos y a la propia distorsión proveniente de la red pública. Pero dado que tal nivel de distorsión también se midió los días laborables durante la noche (por lo que no puede adjudicarse a los inversores) se concluye que se deba más a la propia distorsión de la red pública que a la influencia de los inversores.
- 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. De cualquier modo, se recuerda que el porte del generador es tal que la energía generada representa sólo un 10 % del total consumido.
- 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 determinar que actualmente resultaría 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.
- De todos modos, este concepto no se puede generalizar, ya que si en el futuro se contare con un importante número de paneles fotovoltaicos distribuidos en distintos puntos de la red, el efecto combinado de todos ellos podría hacer que sí la Calidad de Servicio se vea degradada.
- Los sistemas electrónicos para realizar la interconexión no sólo 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 ha sucedido 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. Para 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 esencial el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía.

## REFERENCIAS

- [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.

**ABSTRACT:** In order to assess the effect of the PV-Generator on the preexisting LV network, normalized measurements of harmonic content were performed. Such measurements were performed at the point of coupling between the generator – and the corresponding converters – and the internal LV network. In addition, the energy generated and injected to the LV network as well as the Voltage Magnitude in the internal bar were also measured.

In the article a complete analysis of the measurement results is presented. The harmonic content is assessed according to the hour of the day, and consequently the energy generated by the PV panels. Added to this, we analyze the harmonic content distinguishing between working days and weekends, since the global consumption of the building depends on the type of day.

Finally, it is concluded whether the inclusion of the PV generator affects the building, basically in terms of Power Quality.

**KEYWORDS:** HARMONICS – RENEWABLE ENERGY – PV ENERGY – POWER QUALITY – PV PANEL.