

# CONEXIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A LA RED ELÉCTRICA: CALIDAD DE SUMINISTRO

*J. C. Hernández, A. Medina*

## RESUMEN

La liberalización del mercado eléctrico y el incremento estable de la penetración de la generación distribuida de origen renovable, favorecida por un marco regulatorio y político propicio, son los dos puntos claves que han determinado el interés creciente en la calidad de suministro asociada a la generación eléctrica de origen renovable.

Los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCRs) es un asunto novedoso para las compañías eléctricas en el mundo. No hay bastantes experiencias del impacto sobre la calidad de suministro eléctrico en las redes de distribución que ocasionan los SFCRs y, cómo enfrentarse a la situación debido a la falta de normativa. Reglamentos y normas internacionales fijan algunos requerimientos para SFCRs sin embargo, cada compañía puede imponer un conjunto restrictivo de requisitos. Los aspectos fundamentales de calidad de suministro que deben ser evaluados en el punto de conexión son: variación de tensión y frecuencia, huecos de tensión e intervalos de sobretensión, flicker, desequilibrio, distorsión de armónicos, factor de potencia y energía reactiva.

El objetivo del análisis de este artículo ha sido evaluar y presentar los parámetros de calidad de suministro eléctrico en el SFCR de 200 kWp localizado en el aparcamiento de Universidad de Jaén.

**Palabras clave:** sistemas fotovoltaicos conectados a la red; calidad de suministro; generación distribuida.

## SUMMARY

The electric market liberalization and the steady rise of the penetration of renewable Distributed Generation DG favoured by both political and regulatory mark are the two main points that have determined the rising interest in the power quality associated to renewable electricity.

Grid Connected PV Systems GCPVSSs is a new issue for the utilities in the world. There are not enough experiences about the power quality impact into the grid of GCPVSSs and how to face the situation due to the standard lack. Codes and international standards dictate some requirements for the GCPVSSs, however each utility may impose a exclusive set of requirements. The main grid interface criteria of power quality which should be checked with the utility at the PCC are the following: voltage and frequency regulation, dip, swell, flicker, unbalanced, harmonic distortion, power factor and reactive power.

The analysis aim of this paper has been to evaluate and present power quality parameters in the 200 kWp GCPVSS located at the parking of Jaén University.

**Keywords:** Grid connected-Photovoltaic systems; power quality; distribution generation.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los aspectos esenciales en el suministro de energía eléctrica que en los últimos años ha incrementado fuertemente la atención tanto de los técnicos como de los consumidores ha sido la calidad de suministro eléctrico.

La liberalización del mercado eléctrico y el incremento estable de la penetración de la generación distribuida de origen renovable, favorecida por un marco regulatorio y político propicio, son los dos puntos claves que han determinado el interés creciente en la calidad de suministro asociada a la generación eléctrica de origen renovable.

Por un lado, las aplicaciones modernas de la energía eléctrica son más y más sensibles a perturbaciones de calidad de suministro. Tanto los consumidores como los operadores del sistema han tomado conciencia de que la fiabilidad y la operación eficiente de las redes eléctricas y del equipamiento eléctrico final puede ser solo garantizada basándose en un elevado nivel de calidad de suministro. Es este entorno el que ha propiciado la consideración de la energía eléctrica como un producto, a la cual, como cualquier producto hay que exigir una calidad.

Por otro lado, el efecto de las perturbaciones de calidad de suministro eléctrico asociadas a generadores basados en energías renovables debe tenerse en cuenta, en particular, en escenarios con una elevada tasa de penetración de generación eléctrica distribuida de este origen. Varios estudios<sup>1-2</sup> han mostrado que los límites de compatibilidad definidos en diferentes normas han sido ya excedidos en ciertos casos. Una mayor integración de instalaciones de generación distribuida en la red puede conllevar un deterioro de la calidad de suministro en estas redes. Por tanto, garantizar la calidad de suministro asociada a las energías renovables es de crucial importancia para el futuro desarrollo del sector.

En este contexto se han desarrollado diferentes proyectos europeos como DGFACETS<sup>3</sup> (Improvement of the quality of supply in distributed generation networks through the integrated application of power electronic techniques),<sup>4</sup> DISPOWER (Distributed generation with high penetration of renewable energy sources), MICROGRIDS<sup>5</sup> (Interconnection of small modular generation sources

---

<sup>1</sup> DGFACETS Deliverable D1. 'Evaluation of the quality of supply requirements specified by existing standards, national legislation and relevant technical reports inside and outside the EU'.

<sup>2</sup> Program energiesysteme der Zukunft" (energy systems for the future) <http://www.energiesystemederzukunft.at>

<sup>3</sup> <http://dgfacts.labein.es/dgfacts/index.jsp>

<sup>4</sup> <http://www.dispower.org/>

<sup>5</sup> <http://microgrids.power.ece.ntua.gr/>

to low voltage distribution systems) y otros. Todos estos proyectos han tratado de analizar los resultados técnicos que resultan de un incremento de la penetración de la generación distribuida de origen renovable en las redes de energía eléctrica.

En el sector fotovoltaico, actualmente los sistemas conectados a red están convirtiéndose en una tecnología estándar para generar energía eléctrica en los países desarrollados. Comenzando como instalaciones de corriente continua descentralizadas y aisladas de la red hace algunos años, los módulos fotovoltaicos combinados con inversores constituyen en el día de hoy una de las tecnologías maduras de generación eléctrica en un entorno futuro de generación distribuida a gran escala.

Es en este contexto de cómo puede verse afectada la calidad de suministro eléctrico de la red eléctrica por centrales de origen renovable, y en particular de energía solar fotovoltaica donde surge el trabajo que se presentan en este artículo. La instalación fotovoltaica del proyecto Univer<sup>6</sup>, situada en el Campus de las Lagunillas en la Universidad de Jaén, ha sido seleccionada para este estudio debido a su relativa alta capacidad de generación en relación con la rigidez de la red y la relativa alta sensibilidad de los usuarios conectados en su punto de conexión (PCC).

El estudio analiza una serie de parámetros de calidad de suministro eléctrico en PCC mediante la realización de una campaña de medidas, realizadas en los meses de septiembre y octubre de 2005. Así, variaciones de tensión, huecos de tensión, intervalos de sobretensión, flicker, armónicos, desequilibrios, etc. han sido medidos y analizados de acuerdo a la norma EN 50160<sup>7</sup>.

## 2. ¿QUÉ ES CALIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO?

Hay numerosas definiciones del termino “calidad de suministro”<sup>8,9</sup>. No obstante, todas ellas llevan asociados dos aspectos esenciales:

- Continuidad de alimentación: disponibilidad de energía y su afectación por interrupciones (existen diferentes índices para su valoración como: TIEPI, NIEPI...).

---

<sup>6</sup> P.J. Pérez, et al., ‘Project Univer (Universidad Verde). 200kWp grid-connected...’, Proceedings 3rd WCPVEC, Osaka, Japan, 2003.

<sup>7</sup> EN 50160:2004. ‘Características de la tensión provistas para las redes públicas de distribución de energía eléctrica’.

<sup>8</sup> Eurelectric, ‘Power Quality in European Electricity Supply Networks’. – 2nd edition“, Nov. 2003.

<sup>9</sup> CEER. ‘Quality of Electricity Supply – Initial Benchmarking on Actual Levels, Standards and Regulatory Strategies’. April 2001.

- Calidad de la onda de tensión: la energía eléctrica se suministra a través de un sistema trifásico de tensiones. Una perfecta calidad de onda implica que la tensión sea equilibrada, puramente sinusoidal con amplitud y frecuencia constante.

Por tanto, la calidad de onda de tensión está afectada por distorsiones en la forma de onda respecto a una onda de tensión sinusoidal ideal. Las distorsiones que modifican la amplitud de tensión pueden ser agrupadas en: transitorios, impulsos, fenómenos oscilatorios y variaciones de corta o larga duración (interrupciones, huecos de tensión o intervalos de sobretensión -dependiendo de la magnitud de la variación-). Las distorsiones que modifican la forma de onda se agrupan en: offset de continua, armónico, interarmónico, muecas de tensión, ruidos y fluctuaciones de tensión. Finalmente existen distorsiones que afectan al desequilibrio de tensión o variación de la frecuencia.

En la mayoría de los países europeos las especificaciones de calidad de suministro eléctrico que debe recibir los consumidores finales recae en la normativa europea EN 50160. Sin embargo, no existe una normativa, a nivel internacional, de calidad de suministro que deben cumplir los generadores renovables, en el caso analizado, los generadores fotovoltaicos. No obstante, el empleo de las siguientes normas americanas para estándares de calidad de suministro de generación fotovoltaica es recomendable: IEEE 1547<sup>10</sup>, IEEE 929<sup>11</sup>, IEEE 519<sup>12</sup>. En España, la norma que regula los aspectos de calidad de suministro, entre otros, para generación fotovoltaica es el Real decreto 1663/2000<sup>13</sup>.

### 3. CONEXIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A LA RED. SITUACIÓN PRESENTE EN EUROPA.

La situación presente en los países de Europa en relación con la conexión a red de generadores fotovoltaicos está caracterizada por la diversidad, la complejidad y la fragmentación tanto en el campo de componentes como en el normativo.

Actualmente, los fabricantes de componentes fotovoltaicos para conexión a red (por ejemplo, inversores y sistemas de protección) deben cumplir requeri-

---

<sup>10</sup> IEEE Std 1547- 2003, '*IEEE Standard for Interconnecting Resources with Electric Power*'. [http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547\\_index.html](http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547_index.html)

<sup>11</sup> IEEE Std 929TM-2000, '*IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*'.

<sup>12</sup> IEEE Std 519-1992, '*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*'.

<sup>13</sup> Real Decreto 1663/2000, '*de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión*'.

mientos diferentes de país en país. Así, un equipo que puede ser utilizado en un país no necesariamente puede ser utilizado en el resto de países. Además, otros equipos deben ser cualificados individualmente para algunos países. En general, esta situación crea un entorno poco favorable para un empleo extenso de la tecnología fotovoltaica y además impide la creación de un mercado europeo para generación fotovoltaica.

En el campo normativo la situación no es muy diferente. Existen regulaciones en relación con la integración de los generadores fotovoltaicos a la red que no han sido diseñadas para este propósito particular, sino que derivan de otro tipo de plantas de generación, y por tanto, no son totalmente apropiadas. En algunas circunstancias pequeñas instalaciones fotovoltaicas son tratadas de la misma manera a otras grandes plantas, incrementando significativamente el coste del sistema y su rentabilidad.

Otra barrera principal en este contexto es la falta de estandarización y de procedimientos transparentes para la valoración del impacto de conexión de instalaciones de generación distribuida (en particular de fotovoltaica) a las redes de distribución (media o baja tensión). Para pequeños sistemas fotovoltaicos (rango de algunos kWp) esta valoración no es posible debido a los altos costes. Una alternativa que se está llevando a cabo en estos momentos es considerar los generadores fotovoltaicos como cargas negativas que pueden ser conectadas sin mayores permisos. Sin embargo, este planteamiento no será viable en el futuro con una alta penetración de generación distribuida (fotovoltaica o de otro tipo).

Para salvar las barreras planteadas en los párrafos anteriores una amplia armonización europea de normativa y requerimientos es necesaria como clave para mantener el crecimiento estable de la generación distribuida con energías renovables (fotovoltaica en particular).

#### 4. INSTALACIÓN SELECCIONADA PARA EL ESTUDIO DE CALIDAD DE SUMINISTRO CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.

La instalación fotovoltaica de 200 kWp del proyecto Univer, situada en el Campus de las Lagunillas de la Universidad de Jaén, provincia de Jaén, ha sido seleccionada debido a su relativa alta capacidad de generación comparada con la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión (PCC) (alrededor del 1,5%). Este ratio entre potencia del generador fotovoltaico y potencia de cortocircuito de la red en PCC da una idea del tamaño del generador en relación con la rigidez de la red y, proporciona un parámetro para valorar si es posible la aparición de problemas de calidad de suministro en el punto de conexión.

La instalación fotovoltaica analizada está constituida por tres subgeneradores, ver figura 1. Dos de ellos conectados a la red por sendos inversores trifásicos de

70 kW y el tercero de ellos conectado a la red mediante 40 inversores monofásicos de 2,5 kW.

## 5. VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO MEDIANTE MEDIDAS IN-SITU.

La calidad de suministro eléctrico en el PCC ha sido evaluada a lo largo de un periodo de 2 meses (septiembre y octubre de 2005) utilizando un analizador de calidad de suministro (Fluke 434). Las medidas obtenidas han sido analizadas de acuerdo a norma EN 50160. La figura 1 presenta el sistema estudiado y el emplazamiento del equipo de medida.

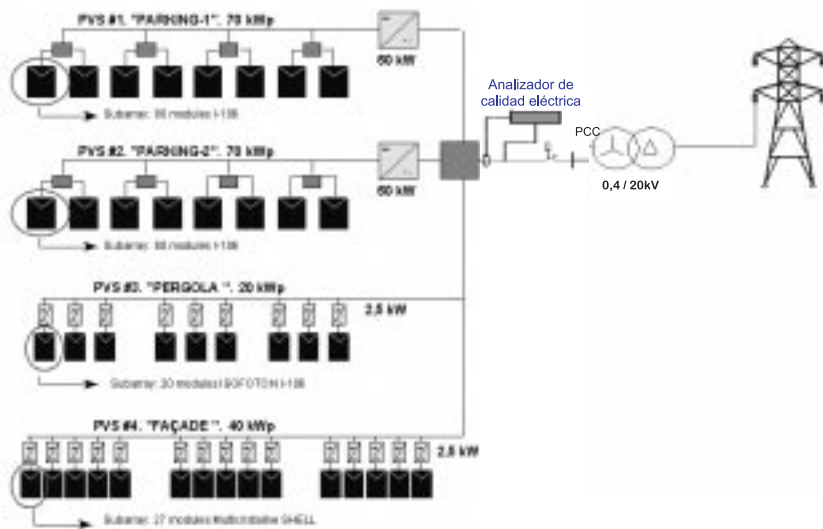


Figura 1. Configuración para las medidas de calidad de suministro eléctrico en el proyecto Univer.

## 6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUMINISTRO

En las siguientes subsecciones se presentan en detalle los resultados de la evaluación de los distintos parámetros de calidad de suministro monitorizados.

### 6.1. Fluctuaciones de tensión, huecos de tensión, intervalos de sobretensiones e interrupciones.

Las perturbaciones asociadas con la variación de la amplitud de la tensión, han sido identificadas como unas de las mayores fuentes de eventos de mala calidad de suministro eléctrico en emplazamientos con instalaciones fotovoltaicas.

Las medidas en la instalación del proyecto Univer revelan numerosos huecos de tensión así como intervalos de sobretensión durante el periodo muestreado. Más de 1000 eventos (huecos e intervalos de sobretensión) fueron registrados en las tres fases de la planta fotovoltaica. Los resultados son mostrados en el figura 2 en forma de diagrama magnitud-duración (diagrama CBEMA).

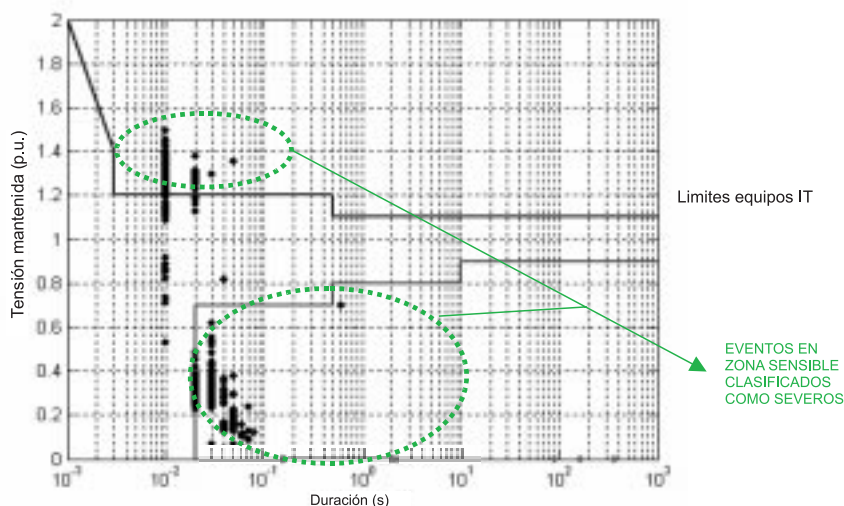


Figura 2. Diagrama CBEMA de la planta del proyecto Univer para la fase LI.

El diagrama muestra que muchos de los sucesos están dentro de la zona sensible, lo que significa, que es probable que causen fallos en equipos sensibles (denominados IT) o en instalaciones sensibles próximas al PCC.

Este número elevado de sucesos ha sido originado por un ajuste muy sensible en la protección de la planta. Como consecuencia, ante cualquier suceso menor de fluctuación de tensión, la planta era desconectada de la red y posteriormente conectada. Así, la combinación de fluctuaciones provenientes de la red con las causadas por la planta fotovoltaica y los ajustes de protección severos causan los numerosos eventos observados. Después de la modificación de los ajustes, muchos menos eventos asociados con la magnitud de la tensión han sido observados estando dentro de límites normativos.

## 6.2. Armónicos.

Muchos técnicos involucrados en el campo de la electricidad todavía mantienen que los inversores causan una elevada distorsión de armónicos. Por esta razón, los armónicos de la planta han sido analizados en detalle. Tanto los armó-

nicos de la corriente inyectada por el inversor como los armónicos de la tensión en el punto de conexión PCC han sido registrados.

Las medidas presentadas en la figura 3 han sido hechas en un día soleado de agosto cuando la producción de la planta fotovoltaica alcanza un ratio elevado en relación con la capacidad máxima de generación. Estas figuras presentan los armónicos individuales de tensión y corriente. Sobre dichas figuras aparece en negro la corriente generada a lo largo del día. Una comparación de las dos figuras revela que la corriente generada no afecta los armónicos individuales de tensión. El mayor armónico en corriente está por debajo de 0,1 A.

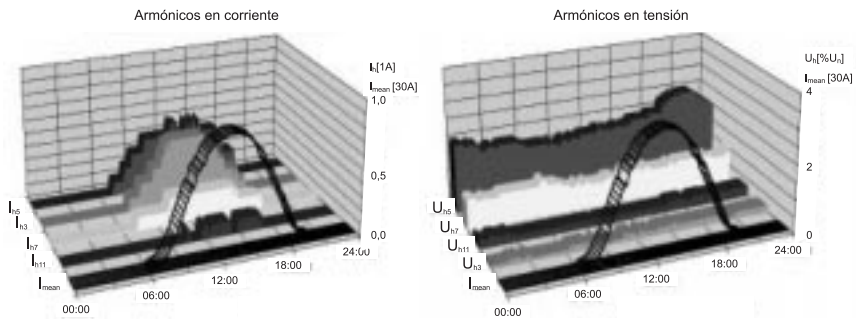


Figura 3. Armónicos en corriente y tensión del generador PV del proyecto Univer. -Día soleado de agosto\_.

La distorsión total en corriente relativa a la corriente asignada de los inversores máxima ha sido de 4,1%. La distorsión total en tensión máxima ha sido de 3,8%. Estos valores son inferiores al 5% para corriente y tensión especificado en IEE Std 929TM-2000 y del 8% establecido en EN 50160.

Un análisis detallado de los datos medidos conduce a la conclusión de que el generador fotovoltaico no tiene un impacto significativo en el contenido de armónicos de la tensión. Esta conclusión se deduce del hecho que el nivel de armónicos observado durante la noche, durante días nublados y durante días soleados con una gran generación fotovoltaica es similar. La distribución de armónicos en el periodo monitorizado se presenta en la figura 4.

El nivel de distorsión de armónicos en el PCC es comparable con los niveles que pueden ser observados en las redes de distribución (predominio del 5 y 7 armónico).

Cuando el generador fotovoltaico utiliza inversores con tecnología PWM, caso de la planta analizada, el contenido de armónicos de la corriente es tan pequeño que el efecto sobre la calidad de suministro puede ser excluido.



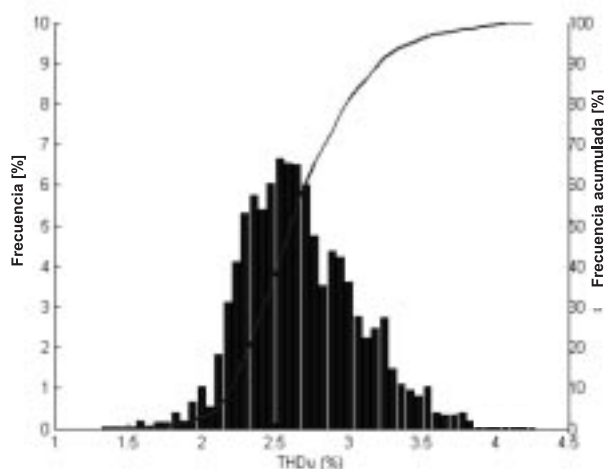


Figura 4. Distribución THD de la tensión (Fase LI).

### 6.3. Flicker.

Se entiende por flicker las molestias causadas en el ojo humano debido al cambio de brillo en tubos de descarga de iluminación (oscilaciones entre 0,5 y 30 Hz) por fluctuaciones apreciables del módulo de tensión ( $<\pm 10\%$ ) (Cíclicas o aleatorias). La severidad de este fenómeno se evalúa utilizando dos índices de flicker uno a corto ( $P_{st}$ ) y otro a largo plazo ( $P_{lt}$ ).

Las medidas realizadas en la planta fotovoltaica analizada tratar de determinar si existe una correlación entre la potencia inyectada por el generador fotovoltaico y la medida de flicker en el PCC.

Los valores medidos para el índice de flicker de larga duración ( $P_{lt}$ ) en el PCC oscilan normalmente entre 0,3 y 0,4 significativamente menor que el valor de 1 establecido en EN 50160.

La figura 5 presenta la evolución de potencia generada por una parte de la planta fotovoltaica a lo largo de una semana y el índice de flicker ( $P_{st}$ ) asociado. También se obtiene eliminando el tiempo el índice de flicker medido en función de la generación. Puede observarse como este índice de flicker permanece prácticamente invariable con el incremento de la potencia generada.

### 6.4. Desequilibrio de tensiones.

El desequilibrio de tensiones (definido en EN 50160 como la relación entre la secuencia negativa y positiva) medido en la instalación ha sido muy pequeño. El 95% de los valores medidos son inferiores al 0,5%.

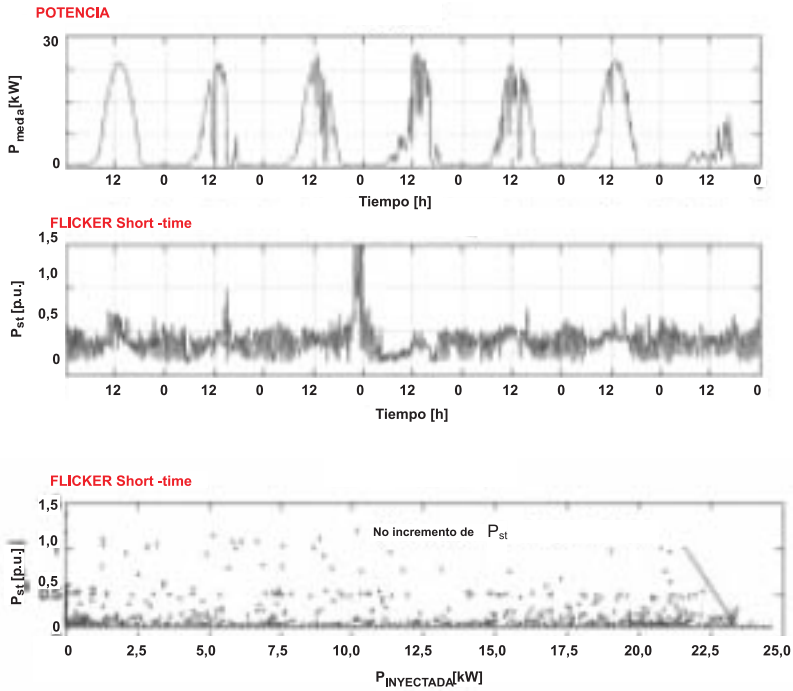


Figura 5. Comparación de índice de flicker de corta duración y la potencia generada por una parte de la planta fotovoltaica.

El hecho de que esta planta disponga de 40 inversores monofásicos alimentados por generadores fotovoltaicos con distinta orientación y, por tanto, con diferente generación en cada fase a lo largo del día, no tiene una influencia apreciable en el desequilibrio de tensiones. Para el caso medido más desfavorable de desequilibrio de corrientes inyectadas, alrededor del 10% durante el pico de generación, la tensión no muestra un incremento significativo de desequilibrio, siendo inferior al valor establecido en EN 50160.

### 6.5. Inyección de corriente continua.

Actualmente el nivel permitido de inyección de corriente continua en la red de alterna varía significativamente dependiendo de la normativa considerada (0,5% según IEE Std 1547-2003 ó 0 A según R. D. 1663/2000). Este umbral diferente fundamentalmente se debe al desconocimiento de los fenómenos asociados con este proceso.

Aunque el empleo de inversores con tecnología PWM típicamente lleva asociado la presencia de corriente continua en la parte de alterna, la planta analizada emplea un transformador de aislamiento al lado del inversor, eliminando la posibilidad de inyección de este tipo de corriente.

## 7. CONCLUSIONES.

La generación fotovoltaica tiene un potencial significativo para contribuir al futuro sostenible de la generación eléctrica basado preferentemente en fuentes de energías renovables. Para asegurar este crecimiento potencial entre otros aspectos, la calidad de suministro eléctrico en las redes de distribución de media y baja tensión, no debe verse afectada con la inclusión de esta generación. Para lograr este objetivo, varios proyectos de investigación europeos en este contexto se han desarrollado y otros continúan desarrollándose o planteándose para el futuro.

La regulación europea existente en relación con la calidad de suministro para la conexión a red de sistemas fotovoltaicos está fuertemente fragmentada y a veces no especificada o adaptada a este tipo de generación. Por tanto, a nivel general y como conclusión de la revisión de este aspecto normativo, una urgente armonización europea es necesaria para alcanzar un desarrollo fuerte del mercado europeo fotovoltaico.

Por otro lado, analizando el aspecto más particular del impacto en la calidad de suministro de una de la planta fotovoltaica, proyecto Univer, en la red, a partir de la campaña de medidas realizadas se deducen las siguientes conclusiones:

- Los generadores fotovoltaicos que tienen inversores con tecnología PWM inyectan corrientes armónicas a la red mínimas, siendo poco probable que afecten a la calidad de suministro. Esta conclusión se aplica incluso a generadores fotovoltaicos con un número importante de inversores como es el caso analizado.
- Flicker y desequilibrios de tensión son comparables a los existentes en la red eléctrica (baja tensión) sin generación fotovoltaica.
- La desconexión del generador fotovoltaico ante un hueco de tensión no siempre es el mejor planteamiento. Si existe una gran integración fotovoltaica su desconexión puede originar problemas en el balance P-f y Q-V.
- El inversor fotovoltaico juega el papel fundamental en la operación del generador fotovoltaico en relación con los parámetros de calidad de suministro.

A medida que la calidad de suministro se ha convertido en un aspecto decisivo para los consumidores, las medidas que capturan la situación actual de este

aspecto de las plantas fotovoltaicas tienen una gran importancia. No solo tienen el interés de valorar la situación calidad de suministro en un punto determinado de la red sino también tienen un gran interés para los equipos de investigación. Estas medidas son útiles para la validación de modelos útiles que permitan posteriormente mejorar los parámetros actuales de calidad de suministro.