

Los sistemas fotovoltaicos en edificios son una forma moderna y sostenible de producir energía eléctrica en el mismo lugar del consumo y su aportación se considera clave para llegar al objetivo de edificios de consumo casi nulo. Su proliferación ha dado lugar a algunos incidentes relacionados con incendios que, si bien han sido estadísticamente poco significativos, demuestran que debe investigarse más en algunos aspectos. Este artículo resume el estudio del estado del arte de la seguridad de los sistemas fotovoltaicos para los usuarios de los edificios y para los equipos de extinción de incendios, realizado dentro del programa de Ayudas a la Investigación 2012 de FUNDACIÓN MAPFRE, en el que también se han ensayado detectores de arco de generadores fotovoltaicos y se ha elaborado una guía de extinción de incendios en edificios con sistemas fotovoltaicos.



Prevención y actuación frente a

INCENDIOS EN EDIFICIOS

con *instalaciones fotovoltaicas*



Latinstock

Por **JULIO AMADOR GUERRA**. Doctor Ingeniero Eléctrico. Catedrático EU. Departamento de Ingeniería Eléctrica ETSIDI, Universidad Politécnica de Madrid. (julio.amador@upm.es).

FAUSTINO CHENLO ROMERO. Ingeniero Superior de Telecomunicación. Responsable de la Unidad de Energía Solar Fotovoltaica de la División de Energías Renovables del Departamento de Energía, CIEMAT. **MIGUEL**

ALONSO ABELLA. Licenciado en Ciencias Físicas. Técnico Superior del Laboratorio de Componentes y Sistemas Fotovoltaicos, División de Energías Renovables, Departamento de Energía, CIEMAT. **HUSSEIN ZEAITER ZEAITER**.

Doctor en Ciencias Físicas. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica ETSIDI, Universidad Politécnica de Madrid.

La instalación de sistemas fotovoltaicos en edificios está en auge en todo el planeta y su futuro es muy prometedor, pudiendo alcanzar a medio plazo más del 50% del mercado fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos se pueden situar sobre cubiertas, superpuestos a fachadas y tejados o integrarse como elementos del propio edificio como cerramientos, recubrimientos, pérgolas, lucernarios, etc.

Cuando los módulos reciben la luz solar generan una corriente eléctrica continua que circula por dentro de las células que constituyen los módulos foto-

voltaicos, por el cableado de conexión de los mismos y a través del inversor que la convierte en corriente alterna. Esto da lugar a que por las propias envolventes de los edificios fotovoltaicos, o por elementos anexos a ellas, circulen corrientes eléctricas importantes a tensiones que, si bien se mantienen dentro de lo que se considera baja tensión, son suficientemente elevadas.

Una instalación fotovoltaica es simplemente un sistema generador de energía eléctrica en baja tensión y, por tanto, bastaría con aplicar los métodos habituales de protección de las instalaciones eléctricas respecto a la seguridad de equipos y personas; pero, en la práctica, los generadores fotovoltaicos tienen unas características singulares, especialmente porque no se puede interrumpir la generación de la fuente de energía solar. Por estos motivos se complica la aplicación de los métodos y dispositivos convencionales de protección y pueden existir riesgos adicionales para los equipos de extinción de incendios.

Análisis de las causas de incendio en sistemas fotovoltaicos

Para el análisis de las causas potenciales de incendio en sistemas fotovoltaicos conviene dividir estos en las siguientes partes: generador fotovoltaico (asociación serie-paralelo de módulos fotovoltaicos) o instalación de corriente continua, inversor e instalación de corriente alterna.

La situación diferenciadora respecto a otro tipo de instalaciones viene da-



Figura 1. Instalación fotovoltaica de tipo general sobre cubierta plana de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid. Fuente: elaboración propia.

da por el generador fotovoltaico, estando el riesgo de incendios del inversor y de la instalación de corriente alterna cubierto por normativas ya establecidas. (Figura 1)

Además de las causas habituales que se dan en cualquier edificio y en cualquier instalación eléctrica, en los generadores fotovoltaicos existen los siguientes riesgos de incendios específicos:

- Puntos calientes en módulos fotovoltaicos.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en módulos fotovoltaicos: interior del módulo fotovoltaico, caja de conexión del módulo fotovoltaico, conectores.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en «cajas de corriente continua»: cajas de paralelos, cajas de protección y maniobra, etc.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en el cableado de corriente alterna.

Para hacer frente a estos riesgos hay que tener en cuenta las características especiales de un generador fotovoltaico:

- Si los módulos fotovoltaicos están expuestos a la luz solar es imposible eliminar la tensión en el campo fotovoltaico .

- La corriente de cortocircuito es sólo ligeramente superior a la corriente en condiciones normales de operación; además, su valor, que depende de la irradiancia incidente, oscila entre valores nulos antes del amanecer a valores máximos en el mediodía solar (Calais *et al.* 2008).
- El valor de la tensión, que depende de las variaciones de la temperatura ambiente y de la radiación incidente, puede oscilar en centenas de voltios entre el inicio y el centro del día.
- Su potencia puede variar desde 1 kW hasta varios MW, lo que conlleva que las intensidades de corriente continua puedan ir desde unos pocos hasta centenas de amperios.

Seguridad eléctrica de sistemas fotovoltaicos

Las protecciones de sobreintensidades y faltas a tierra tienen una gran influencia en el riesgo de incendio de cualquier instalación eléctrica y, por tanto, en un sistema fotovoltaico.

En los sistemas fotovoltaicos en edificios, para conseguir el principio de equipotencial básico en la protección de personas frente a contactos indirectos, todas las masas metálicas del sistema fotovoltaico deben conectarse entre sí y a la misma tierra de masas de utilización del edificio. (Figura 2)

Respecto a la puesta a tierra de un conductor activo (conductor que en funcionamiento normal de la instalación tiene tensión o/y circula eléctrica corriente por él) del generador fotovoltaico existen distintas posibilidades: aislado, puesta a tierra del polo positivo, puesta a tierra del polo negativo y puesta a tierra de un punto intermedio del generador fotovoltaico. (Figura 3)

La solución más habitual utilizada en Europa para la puesta a tierra funcional es la de generador aislado. En este caso, si el inversor dispone de transformador, el sistema de protección para fallos a tierra es un vigilante de aislamiento que se instala en la caja de corriente continua o en el propio inversor. En el caso de generador fotovoltaico aislado e inversor sin transformador se requiere un inte-

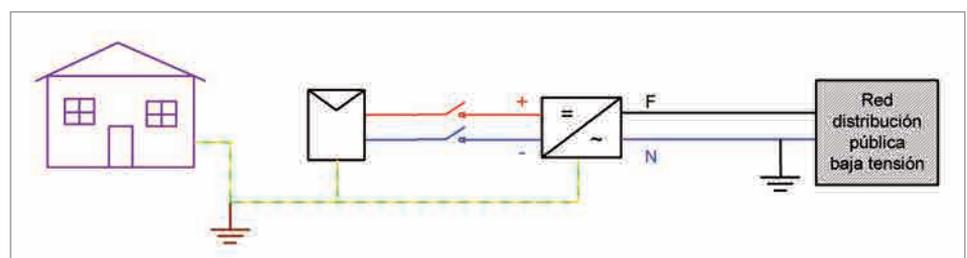


Figura 2. Puesta a tierra de protección de un generador fotovoltaico. Fuente: elaboración propia.

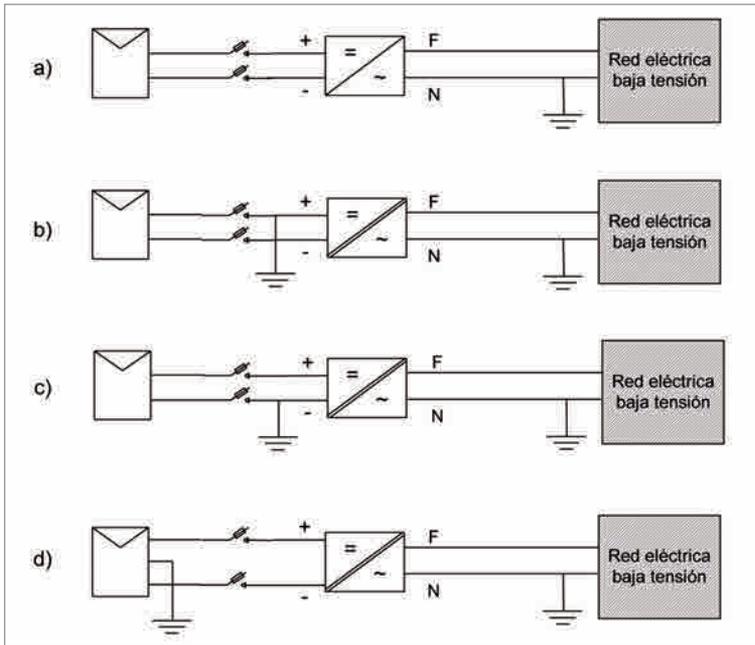


Figura 3. Tipos de puesta a tierra funcional de un generador fotovoltaico: a) aislado b) positivo a tierra c) negativo a tierra d) toma media puesta a tierra. Fuente: elaboración propia.

ruptor diferencial de tipo B conectado a la salida del inversor. Para los casos de sistemas de puesta a tierra efectiva, se debe instalar un fusible, interruptor automático o diferencial, en la puesta a tierra del generador fotovoltaico (Fuentes: BENDER, Hernández *et al.* 2009, NZS 5033).

En cuanto a la protección de sobrecorrientes, se deben instalar dispositivos de protección y desconexión en ambos terminales, positivo y negativo, de cada una de las ramas de la asociación fotovoltaica (CTE-HE5). (Figura 4)

Arcos eléctricos en generadores fotovoltaicos

Como se indica anteriormente, los generadores fotovoltaicos trabajan con tensiones e intensidades elevadas en corriente continua que además son variables, están sometidos a condiciones ambientales extremas y tienen un tiempo de vida muy elevado. Por tanto, aunque para un generador bien diseñado y ejecutado y con material de calidad la pro-

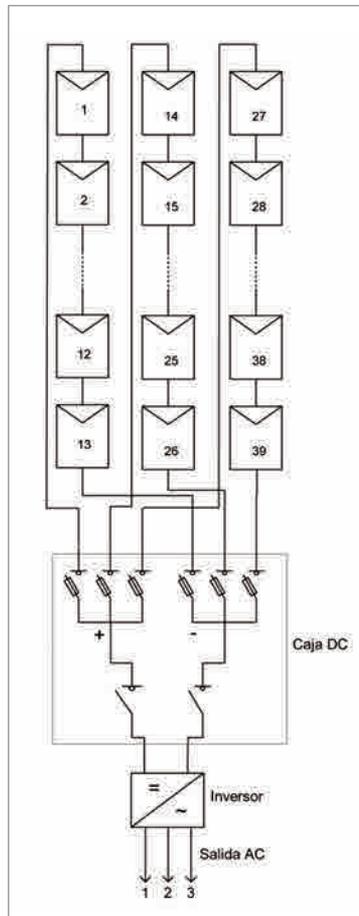


Figura 4. Solución habitual de protección de sobrecorriente y seccionamiento para generador fotovoltaico de tres cadenas de módulos. Fuente: elaboración propia.

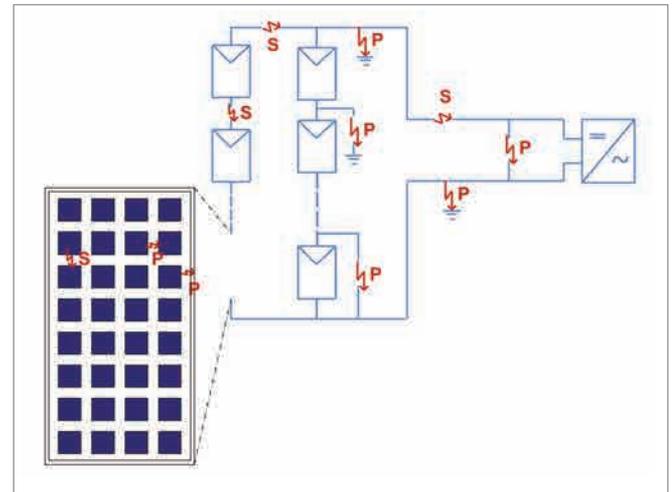


Figura 5. Tipos de arco en generadores fotovoltaicos: S = arco serie, P = arco paralelo. Fuente: elaboración propia.

babilidad de arcos eléctricos sea muy baja, no es posible garantizar que no se produzcan en ningún caso.

Estos arcos son más peligrosos que los arcos de corriente alterna, puesto que no se producen pasos por cero en la señal de corriente. La detección de arcos eléctricos en sistemas fotovoltaicos permite reducir considerablemente el riesgo de incendio. En la Figura 5 se representan los tipos de arco que se pueden dar en un generador fotovoltaico.

Los arcos serie o los arcos paralelo sin tierra no son detectados por los sistemas de protección habitualmente utilizados en generadores fotovoltaicos y que se han descrito en el punto anterior. Por este u otros motivos, las normativas en algunos países consideran el uso de detectores de arco para la protección de

Aunque para un generador bien diseñado y ejecutado y con material de calidad la probabilidad de arcos eléctricos sea muy baja, no es posible garantizar que no se produzcan en ningún caso

generadores fotovoltaicos. Por ejemplo, el NEC *National Electric Code* de EE. UU. establece la obligatoriedad de incluir equipos de protección frente a arcos serie de corriente continua en sistemas fotovoltaicos instalados en edificios para instalaciones con tensión nominal igual o superior a 80 VDC (NEC 2011).

Cuando se detecte un arco, el sistema de protección ha de ser capaz de desconectar el circuito con defecto y todos los componentes del sistema involucrados en la aparición del arco.

Cuando un arco serie o paralelo se origina en generador fotovoltaico, se produce una distorsión en las señales de corriente y tensión que provoca un cambio en las características en frecuencia de estas señales. El principio de funcionamiento de los detectores de arco se basa en el análisis de los cambios que se producen en el espectro en frecuencia de las señales medidas (Strobl *et al.* 2010, Bieniek 2011, Haeberlin 2010). (Figura 6)

Los equipos de detección de arco deben funcionar correctamente sin que se vean afectados significativamente por los fenómenos de atenuación y filtrado de las señales de arco presentes en el circuito de corriente continua, ni por las condiciones de ruido eléctrico presentes en la instalación. A continuación se muestra el registro en el tiempo de las señales de corriente registradas en un generador fotovoltaico en ausencia y en presencia de un arco. Las medidas se han efectuado conectando un banco resistivo o un

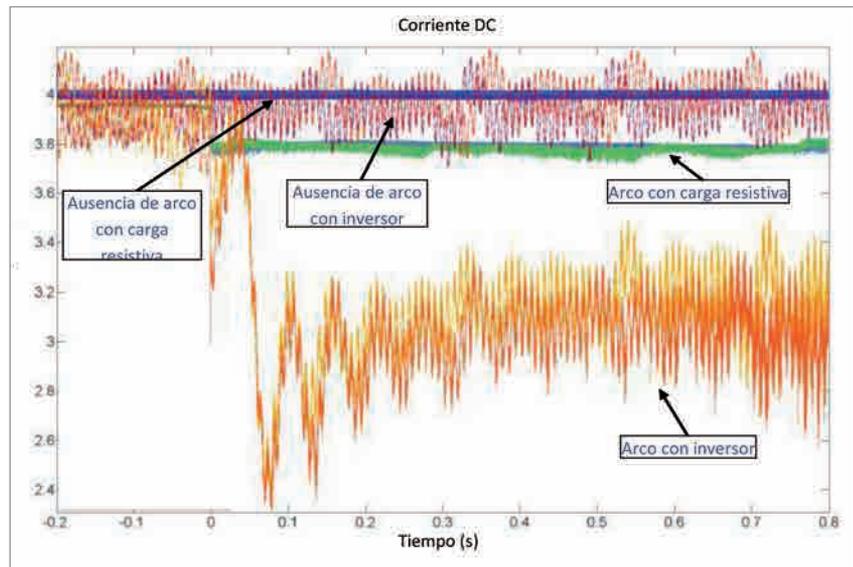


Figura 7. Corriente registrada en un circuito de corriente continua en ausencia de falta y en presencia de un arco para una carga resistiva y con un inversor. La aparición del arco se produce en el segundo 0 y se mantiene durante más de 0,8 segundos. Para cada medida se han registrado dos señales. Fuente: Johnson *et al.* 2011.

Tabla 1. Tipos de arcos eléctricos en un generador fotovoltaico y maniobras de protección a realizar. Fuente: elaboración propia.

Tipo de arco	Acción sobre el generador fotovoltaico
Arco serie	Abrir el circuito
Arco paralelo sin tierra	Cortocircuitar para evitar diferencias de potencial
Arco paralelo a tierra con generador puesto a tierra	Separar de tierra
Arco paralelo a tierra con generador aislado de tierra	Cortocircuitar para evitar diferencias de potencial

inversor como carga del circuito de corriente continua (Johnson *et al.* 2011). (Figura 7)

El análisis en frecuencia de las señales anteriores permite diferenciar intervalos en el espectro donde es notable la presencia de arcos, que es aprovechada por los equipos de protección para detectar su presencia (Strobl *et al.* 2010, Bieniek 2011, Haeberlin 2010).

Una dificultad añadida en la detección de arcos surge cuando se trata de diferenciar si se ha producido un arco serie o paralelo, ya que la señal del arco suele ser similar en ambos casos. Mientras que algunos autores sostienen que los arcos paralelo pueden ser diferenciados utilizando la medida de la resistencia de aislamiento, otros proponen métodos alternativos (Strobl *et al.* 2010, Johnson 2012a).

En la Tabla 1 se indican los tipos de arco y la actuación requerida para eliminarlos o minimizar su impacto.

En la actualidad existen algunos modelos comerciales de detectores de arco para instalaciones fotovoltaicas pero, en la mayor parte de los casos, la funcionalidad de detección se integra en el propio inversor.

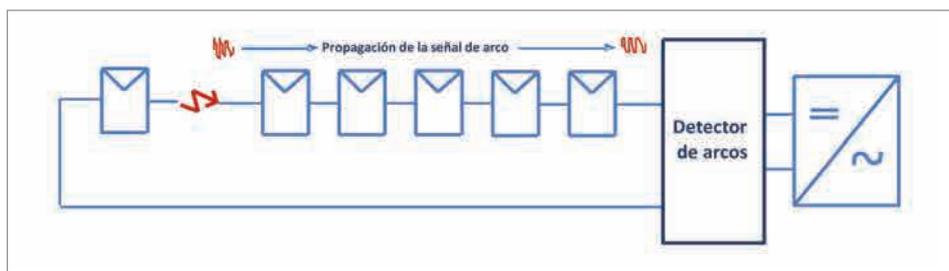


Figura 6. Ejemplo de generación de arco serie. Propagación de la señal de arco y detección por el equipo de protección. En su recorrido la señal se atenúa y se filtra. Fuente: elaboración propia.

Ensayos de detectores de arcos

Con objeto de determinar la aptitud para detectar arcos se ha diseñado y construido un generador de arcos que ha permitido ensayar el detector de arco SANTON ADU E1. (Figuras 8 y 9)

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica del Departamento de Energías Renovables del CIEMAT, siguiendo en parte las indicaciones de la norma UL-1699B de Underwriters Laboratories descrita en la referencia UL-1699B 2011. (Figura 10)

El dispositivo ensayado SANTONADU E1 dispone de capacidad de detección

de arco pero no de interrupción del circuito eléctrico. El dispositivo proporciona un indicador sonoro y luminoso de fallo y dos contactos libres de potencial, normalmente abierto y normalmente cerrado. El cambio de estado de estos contactos ante la detección de un arco permitirá actuar sobre elemento de desconexión del circuito de corriente continua. (Figura 11)

Se han realizado los ensayos siguientes:

- Ensayo de detección de arcos serie.
- Ensayo de detección con enmascaramiento de la señal de operación.
- Ensayo de detección con impedancia de línea.

Con objeto de determinar la aptitud para detectar arcos se ha diseñado y construido un generador de arcos que ha permitido ensayar el detector de arco SANTON ADU E1

La muestra bajo ensayo ha pasado todos los ensayos excepto el ensayo de detección con impedancia de línea, que no ha cumplido los criterios en algunos casos.



Figura 8. Generador de arcos.

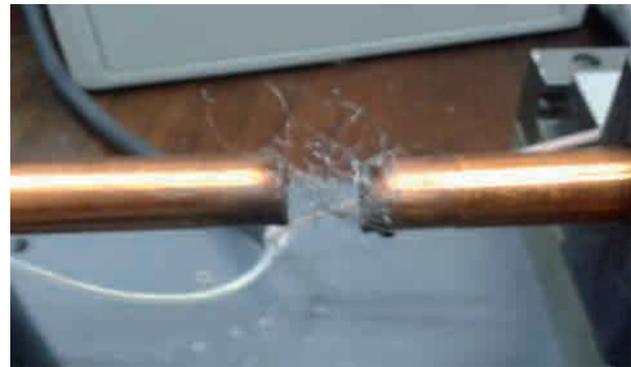


Figura 9. Detalle de los electrodos y de la lana de acero utilizada para activar el arco.

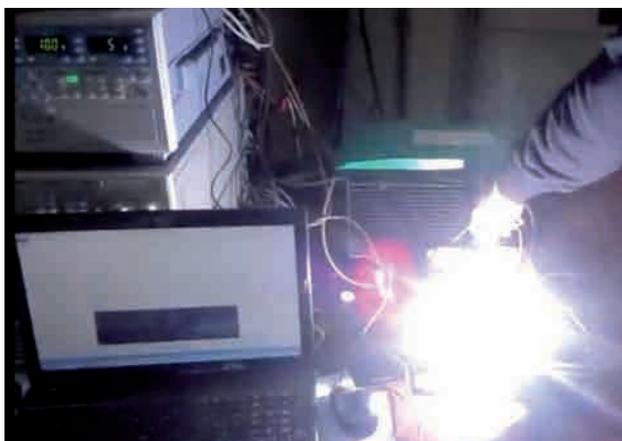


Figura 10. Imagen de uno de los arcos generados en el laboratorio del CIEMAT.



Figura 11. Imagen del detector de arcos ensayado ubicado en la caja de protección IP65, donde se incluye un interruptor manual de corriente continua (32A/1000V).

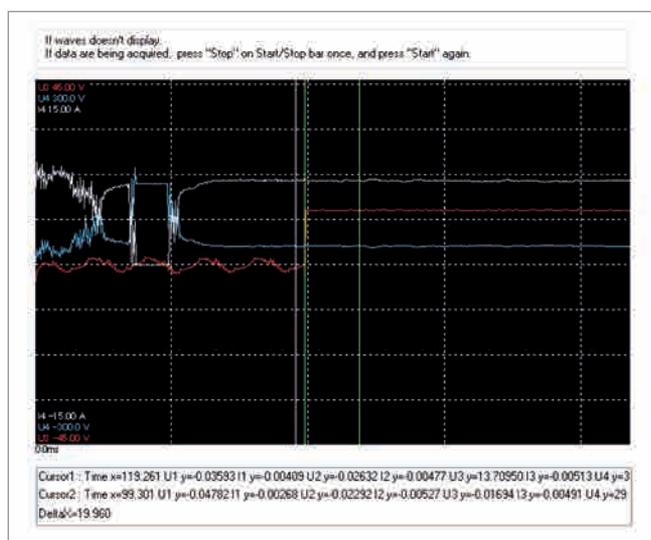


Figura 12. Ejemplo de oscilograma obtenido en los ensayos realizados. Fuente: elaboración propia.

La Figura 12 corresponde a uno de los oscilogramas obtenido con vatímetro/osciloscopio para la medida del tiempo de detección de arco serie. Las señales monitorizadas han sido:

- Corriente de arco, en color blanco.
- Tensión de arco, en color azul.
- Señal de 12 VDC del relé de señalización, contacto normalmente abierto, del dispositivo ensayado, en color rojo.

Resistencia al fuego de módulos y tejados fotovoltaicos

Existen diversas normas de ensayo para determinar el comportamiento de módulos fotovoltaicos respecto al fuego (entre ellas cabe citar la IEC 61730-2:2004 Certificación de seguridad de módulos fotovoltaicos-Parte 2: Requisitos para ensayos. Punto 10.8 Ensayo de fuego) que establecen dos tipos de ensayos de resistencia al fuego: ensayo de propagación de la llama y ensayo de quemado parcial. Estos ensayos permiten clasificar los módulos fotovoltaicos en clase A, B y C, según los criterios indicados en la Tabla 2.

La instalación de módulos fotovoltaicos puede reducir la clase de resistencia al fuego de un tejado si módulos de una calificación más baja se instalan en un tejado con una calificación frente al fuego más alta. Analizando esta problemática se ha llegado a la conclusión de que la actual clasificación con respecto al fuego de los módulos fotovoltaicos no es un buen indicador de la clase de fuego que tendría ese mismo módulo fotovoltaico y el tejado como un conjunto.

Tabla 2. Condiciones de ensayos de resistencia al fuego de módulos fotovoltaicos. Fuente: Norma IEC 61730-2:2004.

Parámetro	Clase A	Clase B	Clase C
Inclinación de los módulos fotovoltaicos	22,6° (o según el fabricante siempre que el ángulo sea mayor de 22,6°)		
Velocidades del viento (m/s)	5,3		
Tamaño de la muestra, ancho x largo (m)	1 x 1,8	1 x 2,4	1 x 3,9
Ensayo de propagación de llama			
Temperatura de la llama (°C)	760	760	704
Duración del ensayo (minutos)	10	10	4
Ensayo de quemado parcial			
Tipo de madera del bloque	Madera de abeto secada al horno sin nudos ni bolsas de resina		
Tamaño bloque (mm)	300 x 300 x 57	150 x 150 x 57	38,1 x 38,1 x 19,8
Número de bloques	1	2	20

En el ámbito de la norma UL 1703 se está desarrollando un nuevo sistema de clasificación con respecto al fuego de módulos fotovoltaicos para reemplazar el actual, que estará basado en los resultados de los ensayos de propagación de llama y de quemado parcial pero, en lugar de únicamente tener en cuenta el módulo fotovoltaico individualmente, tendrá en cuenta el módulo fotovoltaico, la estructura en que se apoya dicho módulo y el tejado, todo como un conjunto.

Requisitos de los sistemas fotovoltaicos para la seguridad del equipo de extinción de incendios

Para un mantenimiento adecuado y una extinción segura en caso de incendio es necesario tener en cuenta una serie de requisitos de acceso y espaciado a la hora de instalar un sistema fotovoltaico en un tejado. Estos requisitos son establecidos con el fin fundamental de (OCFA 2008):

- Garantizar el acceso al tejado o azotea.
- Proporcionar vías para zonas específicas del tejado.

- Proporcionar áreas de ventilación en casos de mucho humo.
- Proporcionar una salida de emergencia desde el tejado.

En cualquier caso, con módulos fotovoltaicos o sin ellos, los puntos de acceso al tejado deben ubicarse en áreas donde las escaleras no se sitúen sobre aberturas como, por ejemplo, ventanas o puertas; y deben estar localizados en puntos fuertes del edificio, donde no entren en conflicto con obstáculos tales como ramas de árboles, cableado, etc.

Los principales requisitos de acceso y espaciado para viviendas residenciales (Figura 13) compuestas de una o dos unidades son:

- Espacio libre de 1 metro de distancia desde la pared exterior que lleva la carga, 1 metro desde la cumbrera y 0,5 metros a cada lado de una limahoya o una limatesa.
- Cada faldón del tejado que contenga módulos fotovoltaicos necesita dos «caminos» de acceso al mismo de cómo mínimo 1 metro de ancho.

Igualmente, las viviendas residenciales compuestas de tres o más unidades, los edificios comerciales, etc. deben cumplir unos requisitos de acceso y es-

paciado que pueden resumirse en los siguientes (OCFA 2008):

- Banda perimetral en la cubierta de al menos 1 metro de ancho.
- Un camino de al menos 1 metro de ancho de acceso central a la cubierta del edificio en ambas direcciones.
- Alrededor de lucernarios, escotillas del tejado o tomas de agua para incendios se debe dejar una distancia mínima de 1 metro.
- Los subcampos fotovoltaicos deben ser de cómo máximo 46 metros, tanto de largo como de ancho.

Además de los criterios de acceso y espaciado, los sistemas fotovoltaicos deben cumplir otras condiciones para garantizar la seguridad del equipo de extinción de incendios. Aunque no existe consenso sobre algunas de ellas, a continuación se enumeran de forma exhaustiva (Meacham B. *et al.* 2012):

- Los sistemas fotovoltaicos deben ser etiquetados y señalizados de una manera clara y sistemática, según se describe más adelante.

Es poco probable que el generador fotovoltaico cause un incendio, pero hay que adoptar precauciones cuando en el edificio incendiado exista una instalación de este tipo

- El interruptor principal de desconexión debe ser fácilmente identificable, debe estar etiquetado y debe poder ser operado sin apertura de puertas, etc. y ser accesible desde la entrada a la vivienda.
- Los conductores activos deben ser identificados con etiquetas cada cierta distancia.
- Si existen baterías deben ser claramente etiquetadas.
- Debe existir un interruptor de corte en carga de las series de módulos fotovoltaicos. Este interruptor debe poder ser accionado desde la entrada a la vivienda.
- El sistema fotovoltaico debe contar con un dispositivo o funcionalidad de detección de arcos que abra el lado de corriente continua en caso de arcos.
- Durante el proceso de autorización de un sistema fotovoltaico, debería suministrarse al puesto local de bomberos de planos con la disposición de módulos fotovoltaicos y la situación de los dispositivos de desconexión.

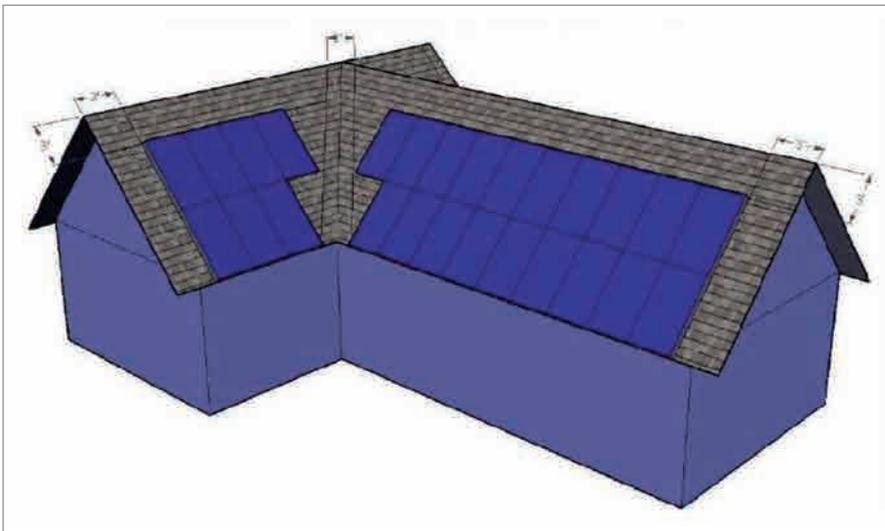


Figura 13. Acceso a tejado a dos aguas. Fuente: OCFA 2008.

Guía para la extinción de incendios en edificios con sistemas fotovoltaicos

Los incendios en los edificios con sistemas fotovoltaicos pueden ser originados por la propia instalación fotovoltaica o por otras causas habituales en edificios. Aunque es muy poco probable que el generador fotovoltaico sea el causante del incendio, es necesario conocer qué precauciones adicionales deben considerarse cuando en el edificio incendiado hay una instalación fotovoltaica.

La seguridad de los bomberos y de otro personal interviniente depende del

conocimiento y la adecuada gestión de estos riesgos a través de la formación y el entrenamiento adecuado.

El control de incendios en los que los sistemas fotovoltaicos están presentes puede requerir del equipo de intervención la adaptación de algunas de las acciones desarrolladas en otros tipos de incidentes con instalaciones eléctricas convencionales o de generación de energía. Si se identifica la presencia de los

sistemas fotovoltaicos y se entienden los riesgos asociados, se podrá mitigar la situación de la manera más segura y efectiva.

Se han encontrado del orden de 20 registros de incendios (FPRF 2010, INES 2013) con sistemas fotovoltaicos afectados, en tres de los cuales ha habido un bombero que ha sufrido un choque eléctrico. En algún caso, los bomberos han dejado quemarse un edificio al detec-

tarse la existencia de un sistema fotovoltaico.

En los últimos diez años se han realizado numerosos trabajos, investigaciones, seminarios, guías, etc. sobre el control de incendios con sistemas fotovoltaicos (FDM 2005, Slaughter R. 2006, CFOSFM 2010, OCFA 2008, TÜV 2008, Liang Ji 2009, FPRF 2010, INERIS 2010, UL 2011, BSW *et al* 2011, Haeberlin H. 2011, BPVA 2011, DSC 2011, AQC 2012,



Figura 14. Ejemplos de módulos fotovoltaicos convencionales de silicio cristalino. Fuente: páginas web de fabricantes.



Figura 15. Ejemplos de módulos fotovoltaicos convencionales de capa fina. Fuente: páginas web de fabricantes.



Fabricante: Solarcentury



Fabricante REM



Fabricante Cottopossagno

Figura 16. Ejemplos de tejas fotovoltaicas. Fuente: páginas web de fabricantes.



TEGOLASOLARE



AEG Power Solutions

Figura 17. Ejemplos de recubrimiento de módulos fotovoltaicos sobre capa de aislamiento de cubierta.



Vista exterior



Vista interior

Figura 18. Ejemplo de lucernario fotovoltaico. Fuente: Elecnor-Atersa.

Los modelos de detectores de arcos en sistemas fotovoltaicos llevan poco tiempo en el mercado como para tener una suficiente experiencia sobre su fiabilidad



Sheuten



Vidursolar



ISON21

Figura 19. Ejemplos de balcones fotovoltaicos. Fuente: páginas web de fabricantes.



Figura 20. Instalaciones fotovoltaicas en el centro comercial: Madrid-2 La Vaguada. Fuente: elaboración propia.



Figura 21. Ejemplos de sistemas fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia.



Figura 22. Caja de corriente continua, inversor y caja de corriente alterna. Fuente: elaboración propia.

EPIA 2012, TÜV 2012, Ben England 2012, AFAC 2013, INES 2013). Los trabajos más recientes (BPVA 2011 finaliza en 2014, INES 2013) se han centrado en limitar la tensión en sistemas fotovoltaicos mediante su segmentación.

La extinción segura de un incendio con un sistema fotovoltaico pasa por considerar los criterios descritos en los puntos siguientes.

■ Identificación de sistemas fotovoltaicos

Para reconocer los sistemas fotovoltaicos e identificar las ubicaciones de los componentes clave del sistema y de los interruptores de desconexión, es con-

veniente que los bomberos conozcan los diversos tipos de módulos fotovoltaicos y diferentes formas de su instalación en los edificios, los inversores y sus conexiones, así como el resto de componentes de los sistemas fotovoltaicos. (Figuras 14 a 22)

Para identificar el resto de componentes del sistema fotovoltaico y, especialmente los interruptores de desconexión, es fundamental que la señalización se realice según los siguientes criterios:

- Toda el sistema fotovoltaico debe estar señalizado.
- La señalización debe ser tanto interna como externa para todos los elementos del circuito de corriente con-

tinua: cerramientos, canalizaciones, cableado (señalizado cada cierta distancia), cajas de conexión, etc., así como para los inversores y cuadros y cajas de corriente alterna.

- Los materiales utilizados para el marcaje deben ser reflectantes, resistentes a la intemperie y reciclables.
- Todas las letras empleadas deben de escribirse en mayúsculas y con excelente contraste con el fondo.

Existen distintas normativas que indican la necesidad del marcado de sistemas fotovoltaicos, por ejemplo, la norma UNE 20460-7-712:2006 «Instalaciones eléctricas en edificios. Reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica».

Otros estándares recogen los criterios que debe cumplir la señalización de un sistema fotovoltaico (Revista *Emergencia 112*, 2011, norma francesa UTE C15-712 2008, código USA IFC 605.11.1.1-4, código USA NFPA 11, 2012).

■ Identificación de los riesgos de los sistemas fotovoltaicos

Los riesgos específicos del equipo de extinción de incendios en edificios con sistemas fotovoltaicos son (UL 2011): choque eléctrico, resbalones y caídas, incremento de carga en la cubierta, peligro por inhalación de sustancias tóxicas y riesgos de las baterías.

El bombero ha de saber que aunque desconecte los cuadros eléctricos y el inversor fotovoltaico se apague, puede ocurrir que un cable cualquiera puede tener tensión por estar conectado al campo fotovoltaico. En consecuencia, si lo corta puede producirse un cortocircuito o un arco eléctrico en el punto de corte.

■ Dimensionar el tamaño del incendio

En el caso de que exista un sistema fotovoltaico involucrado en el incendio se deben tomar las siguientes medidas de seguridad:

- Usar siempre el Equipo de Respiración Autónoma (ERA) y el Equipo de Protección Individual (EPI).
- Evitar llevar encima joyas y piezas metálicas.
- Usar herramientas con aislamiento eléctrico.

Los bomberos deben determinar lo antes posible si el sistema fotovoltaico está afectado por el fuego y notificarlo al mando. La existencia del sistema fotovoltaico no impide necesariamente el inicio de las tácticas ofensivas, ya que el sistema puede no tener impacto sobre el fuego. En cualquier caso, las acciones para llevar a cabo una estrategia ofensiva necesitan ser flexibles debido a la dificultad de «desconectar» el sistema fotovoltaico.

■ Localización y desconexión del sistema fotovoltaico

En los edificios equipados con sistemas fotovoltaicos, el control de los servicios eléctricos generales debe incluir también el sistema fotovoltaico y la sala de baterías. La dotación responsable de cortar el suministro eléctrico convencional tiene que localizar todos los interruptores relacionados con el sistema fotovoltaico en el lado de corriente

continua y en el lado de corriente alterna del inversor o inversores y, si existe, el área de almacenamiento de energía. La desconexión del sistema fotovoltaico debe realizarse siguiendo la siguiente secuencia (FDM 2005):

- Primera acción: apertura del interruptor de corriente alterna del inversor.
- Segunda acción: comprobación que el inversor ha parado.
- Tercera acción: desconexión del interruptor de corriente continua del inversor o, si este no existe, desconexión del interruptor general de la caja de paralelos.

Hay que tener en cuenta que el sistema fotovoltaico puede disponer de un interruptor de seguridad que realiza estas acciones. Este interruptor, si existe, estará señalizado y situado en la entrada del edificio. En algunos casos, estos interruptores no sólo proporcionan una única apertura de todo el generador fotovoltaico, sino también la apertura de cada serie de módulos, lo que aumentará mucho la seguridad de la instalación. (Figuras 23 y 24)

Los bomberos deben ser conscientes de que, incluso accionando todos los interruptores antes mencionados, el generador fotovoltaico mantendrá tensión.

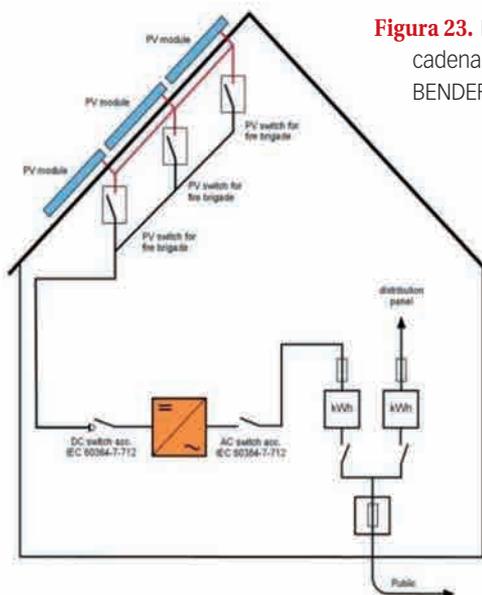


Figura 23. Interruptor de corte en carga para cadena de módulos fotovoltaico. Fuente: BENDER.



Figura 24. Panel de control de sistema fotovoltaico en la entrada del edificio. Fuente: SANTON.

Es decir, en prácticamente la totalidad del periodo diurno todo el cableado existente entre las cadenas de los módulos fotovoltaicos y la caja de conexiones de corriente continua (o el inversor, en el caso de que el interruptor de corriente continua esté integrado en el mismo) estará energizado.

■ Métodos de extinción

Cuando se enfrenta a una estructura en llamas equipada con sistema fotovoltaico, la decisión de emplear o no agua para extinguir el fuego es de gran importancia. En principio hay que evitar dirigir chorros de lanza directamente a la llama y emplear solo extintores químicos secos. Si se emplea el agua, se pueden seguir las siguientes recomendaciones (UL 2011):

- La lanza tiene que tener una presión de unos 700 kPa.
- Dirigir el chorro con un ángulo de 30° para prevenir una corriente eléctrica aguas arriba hacia el operario.
- El operario debe estar a una distancia mínima de la llama que depende de la tensión eléctrica de la instalación o sistema.
- Los chorros directos no se deben emplear.
- Se debe tener en cuenta que el suelo mojado, especialmente si está encharcado, aumenta el riesgo de descarga eléctrica.
- Las cajas eléctricas expuestas a la intemperie no son resistentes a la penetración del agua de los chorros de lanza, por lo que estas pueden presentar un riesgo eléctrico.

■ Acceso a cubiertas (CFOSFM 2010)

Un generador fotovoltaico en un tejado puede afectar a la colocación de una escalera, obligando a la dotación de bomberos a emplear otros métodos para acceder a la cubierta ya que las escaleras nunca deben ser apoyadas en

los módulos. En casas con techo inclinado, los paneles fotovoltaicos normalmente se encuentran en las aguas del tejado con orientación sur. Las estructuras comerciales y residenciales con cubiertas planas pueden tener una gran parte de la cubierta con módulos fotovoltaicos.

La estructura de la cubierta debe ser evaluada para determinar la posibilidad de colapso debido al peso del sistema fotovoltaico. Una estructura de madera, de chapa, etc. puede colapsarse si el fuego les ha degradado lo suficiente. En general, un módulo fotovoltaico tiene un peso de hasta 25 kilogramos y una superficie de hasta 2 m², es decir, unos 12,5 kg/m². Su estructura soporte puede pesar del orden de 30 kilogramos por módulo; por tanto, el peso total por unidad de superficie será de unos 27,5 kg/m².

Los módulos fotovoltaicos, estructuras y canalizaciones representan riesgo de resbalón, caída o tropiezo para los bomberos. Esto es realmente cierto en las siguientes circunstancias:

- Cuando los módulos están integrados en una cubierta inclinada puede resultar extremadamente peligroso y resbaladizo andar sobre ellos.
- En las estructuras comerciales, los módulos fotovoltaicos pueden cubrir la mayor parte de la cubierta y, por tanto, hay poco espacio donde caminar.

Los módulos nunca deben ser pisados ya que tienen una superficie resbaladiza, especialmente si está mojada. Por otro lado, no suelen soportar el peso de una persona.

Como los módulos fotovoltaicos producen electricidad continuamente durante el día, no deben moverse de donde estén instalados, excepto si esto lo realiza un técnico cualificado. Los bomberos pueden verse en la necesidad de contener el fuego y evitar su propagación hasta que los módulos se puedan quitar con seguridad.

Conclusiones

El pequeño número de siniestros registrados demuestra que la probabilidad de incidente en un sistema fotovoltaico es baja. Esto es debido a la calidad de los materiales y equipos empleados, al diseño adecuado de las instalaciones y a un montaje y mantenimiento suficientes.

A pesar de ello, existen unos riesgos potenciales en los sistemas fotovoltaicos que dan lugar a diferentes criterios de seguridad según los países. Mientras en algunos países del entorno europeo se insiste en la calidad de las instalaciones desde el punto de vista del aislamiento y la utilización de sistemas de protección basados en los convencionales, en otros países, principalmente en EE. UU., siguiendo los criterios establecidos para las instalaciones eléctricas convencionales, se establece la obligatoriedad del uso de detectores de arco.

Existen pocos modelos de detectores de arcos en sistemas fotovoltaicos, tanto a nivel de dispositivo como integrados en los inversores, y llevan poco tiempo en el mercado como para poder tener una suficiente experiencia sobre su fiabilidad y la de los ensayos aplicados. Por tanto, es necesario avanzar en las líneas siguientes:

- Caracterización de los distintos tipos de arco eléctrico en los circuitos de corriente continua de los sistemas fotovoltaicos.
- Diseño de detectores de arco que puedan distinguir entre arcos serie y arcos paralelo.
- Perfeccionamiento de los ensayos a realizar sobre los detectores de arco para garantizar un buen funcionamiento de los dispositivos que pasen los ensayos.

No existe consenso sobre la obligatoriedad de que exista un interruptor de desconexión del circuito de corriente continua de un sistema fotovoltaico ac-

cesible al cuerpo de extinción de incendios, ni a las acciones que debe realizar este interruptor.

En el diseño de los sistemas fotovoltaicos en edificios habitualmente no se consideran los criterios de acceso para el equipo de extinción de incendios, ni otras cuestiones relativas a la seguridad del personal de emergencia.

Se considera muy importante una formación y entrenamiento adecuados de los equipos de extinción de incendios para alcanzar un conocimiento suficiente de los sistemas fotovoltaicos que permita su identificación y facilite el establecimiento de acciones eficaces y seguras en la extinción de incendios.

Esperamos que este trabajo contribuya a una mayor seguridad para los usuarios y para los bomberos que pueden verse involucrados en incendios en edificios con sistemas solares fotovoltaicos. ♦

Este trabajo ha sido financiado gracias a una ayuda a la investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

Referencias

- [1] AEG Power Solutions www.aegps.es
- [2] AFAC 2013. Australian Fire and Emergency Service Authorities Council. Safety considerations for photovoltaic arrays.
- [3] AQC 2012. Agence Qualité Construction. Le Photovoltaïque raccordé au réseau dans le Bâtiment.
- [4] Ben England 2012. An Investigation into Arc Detection and Fire Safety Aspects of PV Installations. Tesis doctoral. Murdoch University, Perth, Australia, 2012.
- [5] BENDER www.bender.org
- [6] Bieniek S. *et al*, 2011. Fire prevention in PV plants using inverter integrated AFCI, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2011.
- [7] BPVA 2011. British Photovoltaic Association. Sistemas fotovoltaicos y fuego. Asociación Británica de Fotovoltaica.
- [8] BSW *et al* 2011. Asociación Federal Alemana de la Industria Solar. Protección contra el Fuego. Planificación, Construcción y Mantenimiento de los Sistemas FV.
- [9] Calais *et al* (2008). Over-current protection in PV array installations. IEEE Transactions on energy conversion. Vol 24 No 1 Marzo 2009.
- [10] CFOSFM 2010. CAL FIRE, Office of the state fire Marshal. Fire Operations for PV Emergencies Document November 2010.
- [11] Cottopossagno www.cottopossagno.com
- [12] CTE 2006. RD 314/2006 de aprobación del Código Técnico de la Edificación (Capítulo 3, artículo 15) HE5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica (actualizado por Orden FOM/1635/2013, BOE de 12 de septiembre de 2013).
- [13] DSC 2011: Direction de la Sécurité Civile. Intervention en présence de panneaux photovoltaïque.
- [14] ELECNOR-ATERSA www.atersa.com
- [15] EPIA 2012. European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for PV until 2016. Mayo, 2012.
- [16] FPRF 2010. Fire Protection Research Foundation. Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems. MA, USA.
- [17] FDM 2005. Fire Department of Munich. Photovoltaic: Accident prevention during firefighting.
- [18] FPRF 2010: Fire Protection Research Foundation. Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems. MA, USA.
- [19] Haeberlin 2010. Arc Detector as an External Accessory Device for PV Inverters for Remote Detection of Dangerous Arcs on the DC Side of PV Plants. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain 2010.
- [20] Haeberlin, H 2011. PV and Fire Brigade Safety: No Panic, but Realistic Assessment of Danger and Possible Countermeasures, Haeberlin, H. Borgna, L. y Schaerf, Ph. (Universidad de Bern) en la 26ª European Photovoltaic Solar Energy Conference Hamburgo 2011.
- [21] Hernández *et al* (2009). Guidelines for protection against electric shock in PV generators. ISES-AP 3 International Solar Energy Society Conference – Asia Pacific Region. Sydney 2008.
- [22] Hernández *et al* (2010). Characterization of the insulation and leakage currents of PV generators: relevance for human safety. Renewable Energy 35 (2010) 593 – 601. Elsevier.
- [23] IEC 61730-2:2004 Certificación de seguridad de módulos fotovoltaicos-Parte 2: Requisitos para ensayos. Punto 10.8 Ensayo de fuego.
- [24] IFC 605.11.1.1-4. International Fire Code. USA.
- [25] IMG 2012. Guía de especificaciones técnicas relativas a la protección de personas y de bienes en instalaciones FV conectadas a red. Editada por el sindicato de energías renovable Francés.
- [26] INERIS 2010. L'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques. Prévention des Risques associés à l'implantation de cellules photovoltaïques sur des bâtiments industriels ou destinés à des particuliers, 2010.
- [27] INES 2013. Institut National d'Énergie Solaire. Maltriser le Risque lié aux Installations photovoltaïques, 2013.
- [28] ISON21 <http://www.ison21.es>
- [29] Johnson *et al* 2011. Photovoltaic DC Arc Fault Detector testing at Sandia National Laboratories. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011.
- [30] Johnson J. *et al* 2012. Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults, 38th IEEE PVSC, Austin, TX, 4 June, 2012.
- [31] Liang Ji. 2009. International Photovoltaic Reliability Workshop II. Experience and Studies, Underwriters Laboratories, Inc. 2009. Arizona (USA)
- [32] Meacham B. *et al* 2012. Fire Safety Challenges of Green Buildings. Springer.
- [33] NEC 2011. National Electrical Code USA. Artículo 690.11 (PV). Artículo 210.12 (ac)
- [34] NEC 690-11. Nacional Electric Code, 2011 Edition. NFPA 70, National Fire Protection Association. Batterymarch, MA.
- [35] NFPA 11, 2012. Uniform building Code. National Fire Protection Association.
- [36] NZS 5033 Installation and safety requirements for photovoltaic (PV) arrays. Standards Australia y New Zealand.
- [37] Norma UNE-EN 20460-7-712:2006. Instalaciones eléctricas en edificios. Reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica.
- [38] OCSA 2008. Orange County Fire Chiefs' Association. Guideline for Fire Safety Elements of Solar Photovoltaic Systems, 2008, Orange, USA.
- [39] REM www.rem-gmbh.com
- [40] Revista *Emergencia* 112, 2011. Nº 99. Nueva señal para identificar instalaciones fotovoltaicas.
- [41] SANTON www.santonswitchgear.com
- [42] SCHEUTEN SOLAR www.scheutensolar.com
- [43] Slaughter, R 2006. Fundamentals of Photovoltaics for the Fire Service.
- [44] <http://osfm.fire.ca.gov/training/pdf/photovoltaics/lp06emergency-response.pdf>
- [45] Solarcentury www.solarcentury.com
- [46] Strobl *et al* 2010. Arc Faults in Photovoltaic Systems. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), 2010.
- [47] TEGOLASOLARE www.tegola-solare.com/
- [48] TÜV 2008. Fire Safety Risks at PV Systems and Risk Minimization 2008.
- [49] TÜV 2012. Fire Safety Risks at PV Systems and Risk Minimization 2012.
- [50] UL 2011. Underwriters Laboratories, Inc. Firefighter Safety and Photovoltaic Installations Research Project.
- [51] UL 1699B 2011. Outline of investigation for photovoltaic (PV) DC arc-fault circuit protection. Underwriters Laboratories, Abril 2011.
- [52] UTE C15-712 2008. Installations électriques a base tension. Guide Pratique. Installations photovoltaïques.
- [53] VIDUR SOLAR www.vidurglass.com