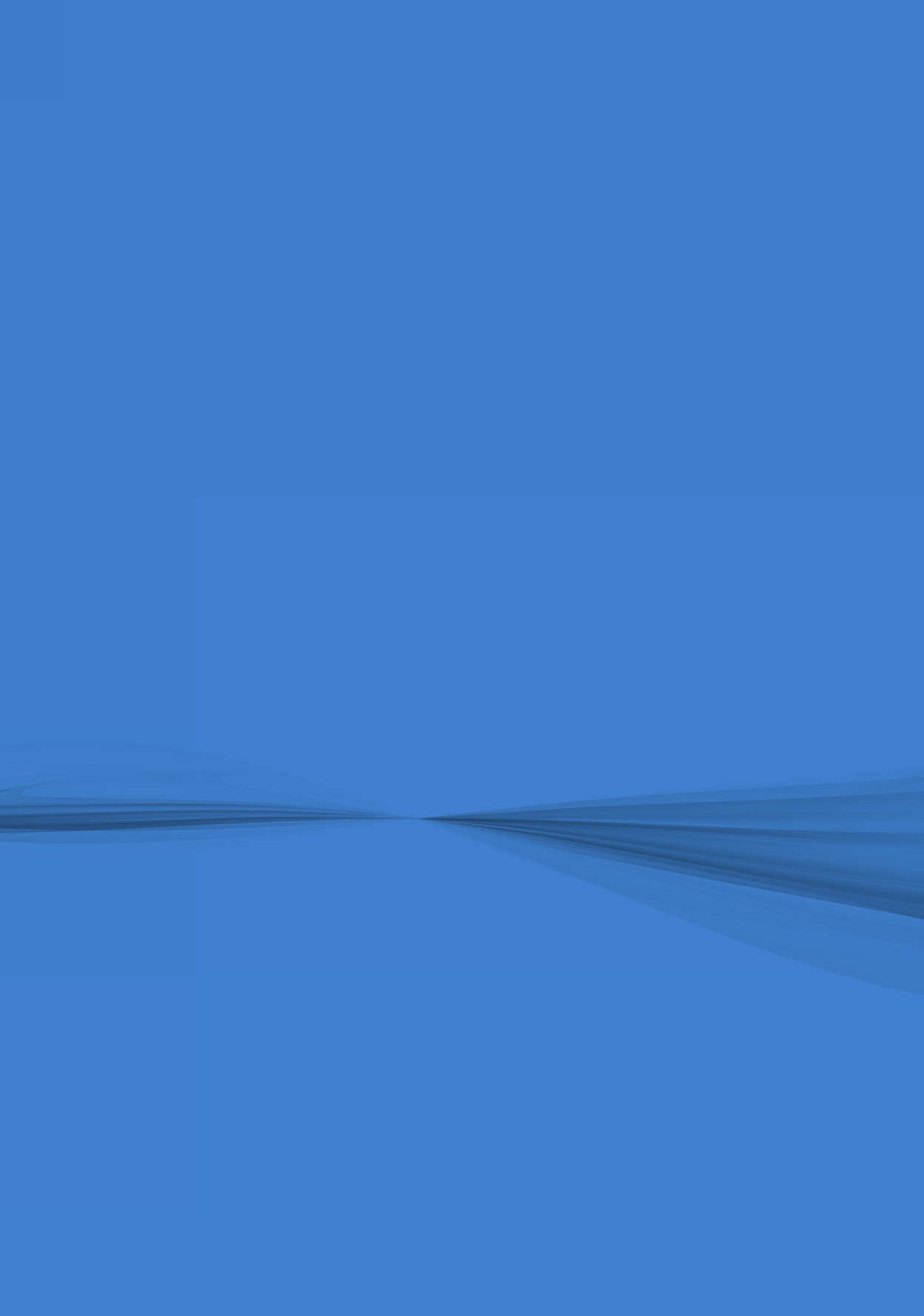


Riesgos de incendio en paneles fotovoltaicos

Andrés Pedreira Ferreño



Riesgos de incendio en paneles fotovoltaicos

Andrés Pedreira Ferreño



FUNDACIÓN
INADE
UDC

CÁTEDRA

LA GESTIÓN DEL RIESGO
Y EL SEGURO



Colección CUADERNOS DE LA CÁTEDRA
Título n.º 8: Riesgos de incendio en paneles fotovoltaicos

1.ª edición: Santiago de Compostela, 2023

© Editorial Fundación Inade

Calle de la Paz, 2, bajo
36202 Vigo (Pontevedra)
<http://fundacioninade.org/> · fundacion@fundacioninade.org

© Universidade da Coruña

Maestranza, 9
15001 A Coruña (A Coruña)
www.udc.gal

© Andrés Pedreira Ferreño

Diseño e impresión: Tórculo Comunicación Gráfica, S. A.
Impreso en España · *Printed in Spain*

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del *copyright*. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

Depósito legal: VG 464-2023
ISBN: 978-84-09-52775-5

ÍNDICE

Presentación	7
Prólogo	9
Introducción	11
1 Producción de electricidad en paneles fotovoltaicos	17
2 Tipología de materiales, paneles solares y arquitectura de una instalación fotovoltaica	21
2.1 Partes de un panel fotovoltaico	24
2.2 Arquitectura y elementos de una instalación fotovoltaica	27
2.3 Inversores de corriente continua en corriente alterna	29
2.4 Almacenamiento de energía baterías	31
3 Implantación de sistema fotovoltaico	37
3.1 Implantación de sistemas fotovoltaicos en cubiertas y envolventes de edificios	38
3.2 Carga de fuego de los materiales	40
4 Propagación del fuego por fachada	43
5 Antecedentes de incendios en instalaciones fotovoltaicas	47
6 Causas de incendio en instalaciones fotovoltaicas	51
6.1 Sobre calentamiento	51
6.2 Cortocircuitos y arcos eléctricos	54
6.3 Fallos y arcos derivados de sufrir daños físicos	61
6.4 Fallos en los inversores	64
6.5 Descargas eléctricas	65
6.6 Fallos en las baterías	66
6.7 Fallos de producto, diseño y ejecución	66

7	Comportamiento de los módulos fotovoltaicos frente a un incendio	71
8	Requerimientos de seguridad contra incendios asociados a instalaciones fotovoltaicas en edificaciones ..	73
	8.1 Reglamentos, normas y directrices	80
9	Consideraciones a tener en cuenta en la propagación de un incendio	83
	9.1 Propagación de llama.....	83
	9.2 Factores materiales	83
	9.3 Parámetros geométricos	83
	9.4 Propagación del incendio por debajo del módulo BAPV	85
10	Prevención de incendios en sistemas fotovoltaicos	89
11	Operaciones en la intervención de los bomberos	91
	11.1 Condiciones en la instalación para la seguridad y mitigación de los incendios en un sistema fotovoltaico.....	93
12	Área de investigación de incendios	97
	12.1 Sobre el terreno.....	98
	12.2 Pruebas de laboratorio	100
13	Proyecto de la instalación	103
14	Proyecto de seguridad contra incendios	107
15	Conclusiones	111
16	Referencias	115

Presentación

FUNDACIÓN INADE, INSTITUTO ATLÁNTICO DEL SEGURO es una organización sin ánimo de lucro cuyo patrimonio íntegro está destinado al logro de su objetivo: crear cultura en materia de gestión de riesgos y seguros.

En el año 2014 se constituyó en su seno un Consejo Asesor, del que forman parte empresas nacionales y multinacionales que apoyan económicamente las actividades de interés general. En el año 2020 se creó un Comité Técnico, integrado por gerentes de riesgos de organizaciones del tejido empresarial gallego, que apoyan a la Fundación en la consecución de sus objetivos.

Fundación Inade destaca por su excelente relación con la universidad gallega, en particular con las universidades de Santiago de Compostela y de A Coruña, siendo la universidad compostelana su brazo investigador y la universidad herculina su apoyo en lo relativo a la formación y transferencia del conocimiento.

En diciembre del 2015, y fruto de un convenio de colaboración con la Universidade da Coruña, se creó la “Cátedra Fundación Inade – UDC: La gestión del riesgo y el seguro”, primera Cátedra institucional que sobre esta materia se implantó en una universidad pública española.

Uno de los objetivos de la Cátedra es el fomento y la divulgación de la cultura de gestión responsable del riesgo en la sociedad. Para cumplir este objetivo la Cátedra puso en marcha una colección denominada Cuadernos de la Cátedra, en la que se abordan temas de importancia en el ámbito de la gerencia de riesgos, que ayudan al empresario a tomar las decisiones más adecuadas a sus intereses.

Fundación Inade, a través de su editorial, adquirió el compromiso de editar cada una de las obras de la colección, trabajos que cuentan con el apoyo económico de la Xunta de Galicia a través de la Vicepresidencia Primeira e Consellería de Economía, Industria e Innovación y, en especial, del Instituto Galego de Promoción Económica (IGAPE).

Hoy ponemos en manos del tejido productivo el octavo ejemplar de los Cuadernos de la Cátedra, que lleva como título, *Riesgos de incendio en paneles fotovoltaico*, trabajo elaborado por Andrés Pedreira Ferreño, ingeniero industrial especialista en seguridad contra el fuego y director de Pixeling .

Esta publicación también estará disponible en la web de la Cátedra (www.catedrafundacioninade.org) y de Fundación Inade (www.fundacioninade.org).

FUNDACIÓN INADE, INSTITUTO ATLÁNTICO DEL SEGURO

Prólogo

Que se publique un nuevo libro sobre ciencia o divulgación del conocimiento siempre es una gran noticia. Que el libro que se publica sea ya el octavo volumen de una colección de obras originales, diseñada y seleccionada por una cátedra en una universidad pública gallega, es todavía mejor noticia. Si, además, esa colección es el fruto de una colaboración entre instituciones y empresas del sector privado, la universidad y las administraciones públicas gallegas la satisfacción es aún mayor.

La colección “Cuadernos de la cátedra”, perteneciente a una colección llamada “Cuadernos de la cátedra” que se ha confeccionado en la Universidade da Coruña, es un proyecto que hemos venido apoyando desde la Xunta de Galicia desde que se publicó su primer volumen en 2016. Está conformada por obras muy diversas, unidas entre ellas por un denominador común: todos giran alrededor del mundo de la gestión de los riesgos empresariales y del mercado asegurador.

Se trata de un grupo de trabajos que inciden los distintos aspectos de esa compleja realidad de la administración de los riesgos empresariales y su transferencia a las compañías aseguradoras. Hasta ahora, las disciplinas que habían inspirado los libros habían sido siempre las ciencias económicas y el Derecho.

El nuevo libro, sin embargo, también versa sobre gestión de riesgos, pero contemplados desde la visión del ingeniero. Sólo por este motivo, esta obra constituiría una novedad con respecto a las anteriores, viniendo a completar, de algún modo, el espectro de disciplinas que rodean a la gestión de riesgos.

El tema del libro, por otra parte, posee un enorme interés. Lejos de tratar sobre un problema técnico que difícilmente podría interesar a personas distintas de los propios ingenieros del ramo, la obra expone con claridad un problema que afecta y amenaza no sólo a todas las empresas, sino también a la mayor parte de los ciudadanos.

Basta con echar una ojeada a las cifras que se exponen en el trabajo para confirmar la impresión que todos tenemos acerca de la rapidez con la que se está extendiendo la práctica de colocar paneles solares en las instalaciones industriales –y en los edificios de todo tipo– en España y en todo el mundo.

La instalación de paneles fotovoltaicos se ha convertido en una inversión que redunda en una mayor eficiencia y ahorro en el uso de la energía, así como en un ejemplo de lo que se puede hacer para limitar nuestra huella de carbono.

Descubrir que detrás de esta pequeña revolución fotovoltaica se cierne un inadvertido y desconocido riesgo de incendio es una inesperada –y desagradable– sorpresa de la que conviene informar cuanto antes a todos los posibles afectados. Lo sucedido con los almacenes logísticos de Amazon en Estados Unidos, que el autor cuenta en la introducción, debe servir como ejemplo para que no les llegue nunca a suceder lo mismo a las empresas gallegas, al menos a las que, de aquí en adelante, tengan el propósito de proceder a instalar paneles fotovoltaicos en sus instalaciones.

El lector descubrirá al leer el trabajo que el texto está escrito en un tono divulgativo, fácil de seguir y de entender. De su lectura se extraen fácilmente los orígenes del problema, sus causas y el modo en el que podemos afrontarlo con éxito. En este sentido, pretende alertar sobre un riesgo grave y alarmante si no se hace nada para afrontarlo, pero al mismo tiempo perfectamente gestionable si nos ponemos manos a la obra y lo confrontamos como es debido.

Después de leer este libro, ningún empresario debería tener dudas acerca de lo que le corresponde hacer con sus instalaciones fotovoltaicas. Estamos convencidos de que la inmensa mayoría de los empresarios gallegos pertenecen a este tipo y, por consiguiente, gestionarán el riesgo como se merece. De lo único que nosotros tenemos que asegurarnos es de hacer llegar la obra al mayor número de personas que sea posible.

No quisiera terminar este prólogo sin hacer alusión a la importancia de la actividad de divulgación del conocimiento sobre gestión de riesgos que está realizando la Cátedra institucional de la Universidade da Coruña, patrocinada por Fundación Inade.

Algunos de los últimos proyectos legislativos de la Unión Europea, en los que se regulan temas tan trascendentes como la inteligencia artificial o la ciberseguridad, imponen regulatoriamente a la gestión de riesgos como mecanismo para administrar correctamente a las empresas.

El trabajo de promoción y formación sobre esta disciplina, en un contexto normativo como el que plantean estas futuras directivas y reglamentos, no puede resultar más apropiado. Ojalá queden por delante muchos cuadernos de la Cátedra con los que seguir dando al tejido productivo gallego más instrumentos para fortalecerse.

COVADONGA TOCA CARÚS

Directora Xeral do Instituto Galego de Promoción Económica
da Xunta de Galicia

Introducción

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable obtenida directamente de los rayos solares. Este tipo de tecnología se define como activa, ya que se produce un cambio de energía, en concreto, se transforma la energía solar en energía eléctrica, de forma limpia y eficiente, mediante las células fotovoltaicas.

Los sistemas fotovoltaicos en edificios de todo tipo, ya sea residencial o industrial, 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.

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. Actualmente, la instalación de este tipo de sistemas en las cubiertas de naves industriales está cada vez más extendida, frente a su instalación en suelo (huertos solares), básicamente por los problemas logísticos que estos últimos pueden ocasionar.

Su proliferación ha dado lugar a incidentes relacionados con incendios en los que se ven involucradas este tipo de instalaciones (ya sea como causa o como instalación afectada), desde prácticamente los años 80, siendo cada vez más habituales a medida que va aumentando su número.

En España el interés por el aprovechamiento de la tecnología fotovoltaica es evidente, al ser uno de los países europeos con mayor cantidad de horas de sol. A pesar de todas las trabas legales que han ido apareciendo por el camino, continuó progresando, gracias al abaratamiento de las placas solares y el progreso tecnológico de eficiencia de las mismas, y especialmente a raíz del Real Decreto 244/2019 de 5 abril, sobre autoconsumo eléctrico, del que se pueden beneficiar tanto comunidades de vecinos como los polígonos industriales.

El futuro de la energía fotovoltaica en España está garantizado, tal y como demuestra el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), que traza la meta de un sector eléctrico 100 % renovable en 2050, con una etapa intermedia del 74 % en 2030. Esto hará que la tecnología de generación renovable, y con ella la fotovoltaica, sea la de mayor crecimiento en los próximos 10 años.

La Unión Española Fotovoltaica (UNEF) es la asociación sectorial de la energía solar fotovoltaica en España, con una representatividad de más de 400 empresas, más del 85 % de la actividad del sector en España, y se constituye como el portavoz de la práctica totalidad de la industria: productores, instaladores, ingenierías, fabricantes de materias primas, módulos y componentes, distribuidores y consultores. Según los datos registrados por UNEF, en el año 2018 se instalaron en España 261,7 MW de nueva potencia fotovoltaica, lo que supone un incremento del 94 % con respecto a los 135 MW instalados en 2017 y un importante crecimiento frente a los 55 MW registrados en 2016 y los 49 MW de 2015.

Todos estos antecedentes nos indican de manera clara que en los próximos años veremos cómo se multiplica el número de instalaciones fotovoltaicas en las cubiertas de nuestras naves industriales, y en consecuencia, el aumento de los posibles incendios en los que estas se pudieran ver afectadas, por lo que se hace necesario profundizar en este aspecto.

Con el cambio climático y el aumento de precio y tasas en las energías no renovables como el gas natural, el gasóleo, etc., este tipo de instalaciones de estructuras renovables es cada vez más demandada. La energía solar fotovoltaica es una de las más desarrolladas y eficientes del mercado hoy en día y, además, es fácil de instalar y se pueden utilizar las cubiertas de los edificios para alojar estos sistemas, aprovechando el máximo espacio.

Los sistemas fotovoltaicos están envejeciendo sin apenas requerimientos de instalación desde el punto de vista de la seguridad contra los riesgos como el incendio, agravado por una falta de mantenimiento e inspecciones periódicas, las cuales son de vital importancia para prevenir un incidente.

A lo largo de los años, se han producido numerosos incidentes alrededor del mundo derivados del uso de esta tecnología.

Desde 1980 se cuenta con documentación sobre casos de incendios en sistemas de aprovechamiento solar en E.E.U.U. El primer incendio identificado ocurrió en el estado de Colorado, en el que se disponía de un sistema de calentamiento en una residencia deshabitada y se incendió al producirse un fallo en el material de aislamiento.

Posteriormente, en la década del 2000, se presentaron casos documentados en relación a los paneles solares, siendo el más representativo el incendio sucedido en California en abril de 2009. En este suceso, una gran matriz solar fotovoltaica compuesta por 166 cadenas de 11 módulos cada una, instaladas en el tejado de una tienda fue el causante del inicio de un incendio como se puede apreciar en la figura a continuación.



Fig. 1 Incendio en instalación fotovoltaica.

En este caso, el accidente se atribuyó a un arco eléctrico que generó el incendio, este tipo de evento, es una de las causas habituales en instalaciones de sistemas fotovoltaicos, por ello, su prevención es un tema de prioridad.

Los incidentes se fueron acumulando con el paso de los años sin que la sociedad haya prestado especial interés, sin embargo, noticias recientes sobre instalaciones fotovoltaicas en grandes compañías como la cadena de tiendas Walmart que demanda a Tesla por varios incendios relacionados con sus paneles solares. Según un comunicado, al menos 7 de las instalaciones situadas en diferentes regiones han sufrido un incendio, lo que ha obligado a Walmart a desactivar todos los sistemas que ha puesto en marcha Tesla por cuestiones de seguridad. Una acción que además se ha acompañado por una demanda ante las autoridades norteamericanas.

Lo peor de todo ha sido el resultado de los análisis realizados por los inspectores de Walmart, que han determinado que Tesla “había cometido una negligencia generalizada y sistemática, y no había cumplido con los estándares de calidad de la industria en la instalación, operación y mantenimiento de sus sistemas solares.” Algo que los ha llevado a presentar una demanda ante un tribunal estatal de Nueva York.

El siguiente ha sido la multinacional Amazon que después de que en la tarde del 14 de abril de 2020, decenas de bomberos llegaron a un almacén de Amazon en Fresno, California, mientras espesas columnas de humo salían del techo del almacén de 82.000 metros cuadrados.

Unos 220 paneles solares y otros equipos en la instalación, resultaron dañados por el incendio que fue causado por “un evento eléctrico indeterminado dentro del sistema de energía solar montado en la cubierta del almacén logístico”, según comentarios de Leland Wilding, jefe de bomberos de Fresno.

Un poco más de un año después, unos 60 bomberos intervienen en una instalación de Amazon de mayor tamaño en Perryville, Maryland, para extinguir un incendio similar según informaron los medios de comunicación locales.

En los meses intermedios, al menos otros cuatro centros logísticos de Amazon se incendiaron o experimentaron explosiones eléctricas debido a problemas en sus sistemas de generación de energía solar, entre abril de 2020 y junio de 2021, Amazon experimentó “incendios críticos o eventos de arco eléctrico” en al menos seis de sus 47 instalaciones en América del Norte con instalaciones solares, afectando al 12,7 % de dichas instalaciones.

En junio del año pasado, todas las instalaciones de Amazon en E.E.U.U. con energía solar fueron desconectadas temporalmente.

La empresa tenía que asegurarse de que sus sistemas estuvieran diseñados, instalados y mantenidos correctamente antes de “reactivar” cualquiera de ellos debido al índice y gravedad de los siniestros ocurridos.

Una tesis doctoral recientemente realizada en la Universidad de Edimburgo por Jens Steemann Kristensen investigó los aspectos de seguridad contra incendios relacionados con los módulos fotovoltaicos.

Algunos de los datos estadísticos proporcionados por dicho trabajo son los siguientes:

- Un análisis de árbol de fallos basado en todos los datos disponibles públicamente estableció una frecuencia anual de 29 incendios por gigavatio de capacidad, lo que predice que habrá muchos incendios relacionados con los sistemas fotovoltaicos en los próximos años.
- El análisis del árbol de fallos mencionado encontró que el 51 % de los incendios fueron causados por un fallo eléctrico de un componente relacionado con el sistema fotovoltaico. Entre estos, los inversores, conectores y aisladores representan las fuentes de ignición más probables, siendo

responsables respectivamente del 11 %, 12 % y 14 % de todos los incidentes. Los tres tipos de componentes estaban expuestos errores humanos, ya que la instalación o el ensamblaje incorrectos podrían provocar fallos en los componentes y, por lo tanto, incendios, datos que también se corresponde con una cuantificación reciente de riesgos en sistemas fotovoltaicos publicada por la Agencia Internacional de Energía. El 49 % restante de los incendios fue causado por un componente desconocido.

Al poner estos datos en el contexto del estudio sobre la frecuencia de incendios (29 incendios/GW/año instalado), que fue respaldado en gran parte por datos de Italia en el período de 2009 a 2015, se esperan muchos incendios derivados de implementación de las instalaciones solares. De hecho, por simple multiplicación, se estima aproximadamente el número de incendios relacionados con la energía fotovoltaica en la UE sea de 9 280 incendios en 2025 y 17 400 incendios en 2030.

Estos siniestros y su posible frecuencia han puesto el foco de atención de propiedades, compañías de seguros e ingenierías de riesgos y seguridad contra incendios sobre las instalaciones fotovoltaicas.



1 PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN PANELES FOTOVOLTAICOS

La producción de electricidad en paneles fotovoltaicos se basa en el principio de la conversión de la energía solar en electricidad. Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células solares, que son los componentes que convierten la energía solar en electricidad.

Cuando la luz solar incide en la célula solar, los fotones (partículas de luz) excitan los electrones en el material semiconductor de la célula, lo que crea una corriente eléctrica en el circuito. La corriente eléctrica producida por una célula solar es relativamente pequeña, por lo que se deben conectar varias células solares en serie o en paralelo para obtener la cantidad de energía eléctrica necesaria para alimentar un sistema eléctrico.

Como se ha expuesto anteriormente, los paneles fotovoltaicos pueden ser conectados en serie o en paralelo para aumentar la cantidad de energía eléctrica producida. En un circuito conectado en serie, las células solares se conectan en una cadena, de modo que la corriente eléctrica fluye a través de todas las células solares en secuencia. En un circuito conectado en paralelo, todas las células solares se conectan en paralelo, de modo que la corriente eléctrica se divide entre todas las células solares.

La cantidad de energía eléctrica que produce un panel fotovoltaico depende de varios factores, como la intensidad de la luz solar, la temperatura del panel, la eficiencia de la célula solar y el ángulo de inclinación del panel en relación con el sol. La intensidad de la luz solar es un factor clave en la producción de energía eléctrica, ya que cuanto mayor sea la intensidad de la luz solar, mayor será la cantidad de energía eléctrica que se produce.

En general, los paneles fotovoltaicos tienen una vida útil de alrededor de 25 a 30 años, y su producción de energía eléctrica disminuye ligeramente con el tiempo debido a la degradación natural de los materiales.

Los paneles de las estructuras fotovoltaicas son por lo tanto, generadores de energía eléctrica a partir de energía lumínica, en esta parte la corriente generada es continua. Sin embargo, la distribución y consumo utilizado en las edificaciones es de corriente alterna.

A continuación, se definen los conceptos de corriente alterna y corriente continua.

La corriente alterna es un tipo de corriente eléctrica que cambia su dirección y magnitud de manera periódica, es decir, se mueve en una dirección y luego se invierte y fluye en la dirección opuesta. Este tipo de corriente se utiliza ampliamente en la transmisión de energía eléctrica a largas distancias y en la mayoría de las redes eléctricas de los hogares y edificios.

La corriente alterna se genera mediante un dispositivo llamado generador de corriente alterna, que produce un flujo de electrones que cambia de dirección y magnitud en un ciclo repetitivo. El valor de la corriente alterna cambia continuamente a lo largo del tiempo, y se mide en amperios (A). El ciclo completo de una corriente alterna se divide en dos fases: la fase positiva y la fase negativa.

El valor de la corriente alterna cambia en función de la frecuencia de la corriente, medida en Hertz (Hz), que indica el número de ciclos completos que se producen en un segundo. En la mayoría de las redes eléctricas de los hogares y edificios, la frecuencia de la corriente alterna es de 50 o 60 Hz.

Existen dos tipos de corriente alterna:

- **Monofásica:** Toma una sola fase de la corriente trifásica junto a un cable neutro. Es el estándar utilizado en España para la generación y transmisión de la electricidad ya que, se genera 230 voltios. Se utiliza en instalaciones domésticas.
- **Trifásica:** Cuenta con tres corrientes alternas de idéntica frecuencia, amplitud y valor, donde presentan una diferencia de fase entre ellas de 120° y que se dan en un orden determinado. Se utiliza en instalaciones industriales.

La corriente continua es un tipo de corriente eléctrica que fluye en una sola dirección constante y no cambia de polaridad con el tiempo.

La corriente continua se puede generar mediante un dispositivo llamado fuente de corriente continua, como una batería o un rectificador. La corriente continua se mide en amperios (A) y su valor se mantiene constante en el tiempo, siempre y cuando la fuente de corriente se mantenga constante. En la corriente continua, la polaridad del flujo de electrones no cambia, lo que significa que los electrones fluyen siempre en la misma dirección.

A diferencia de la corriente alterna, la corriente continua no se invierte periódicamente y su magnitud permanece constante, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren una alimentación eléctrica estable y constante. Además, la corriente continua puede ser fácilmente almacenada en baterías y

utilizada en dispositivos portátiles, como teléfonos móviles, laptops y reproductores de música. Sin embargo, la corriente continua no se transmite fácilmente a largas distancias, por lo que se utiliza principalmente en sistemas de baja tensión.

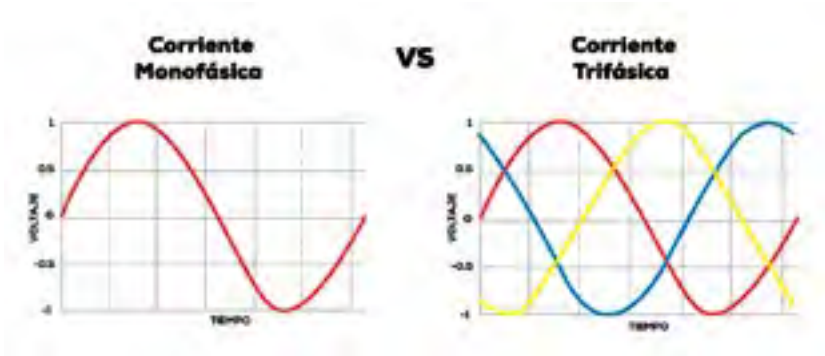


Fig. 2 Diferencia entre corriente monofásica y trifásica.

Los paneles solares funcionan a partir de energía solar, la cual se transforma en electricidad en forma de corriente continua. Un controlador de carga trabaja para examinar la energía del panel solar, ya que dicha inversión puede dañar al panel solar. El sistema de baterías actúa como almacenamiento de energía eléctrica y se utiliza cuando no hay luz solar disponible. Desde este sistema se conecta al inversor para convertir la corriente continua a corriente alterna.

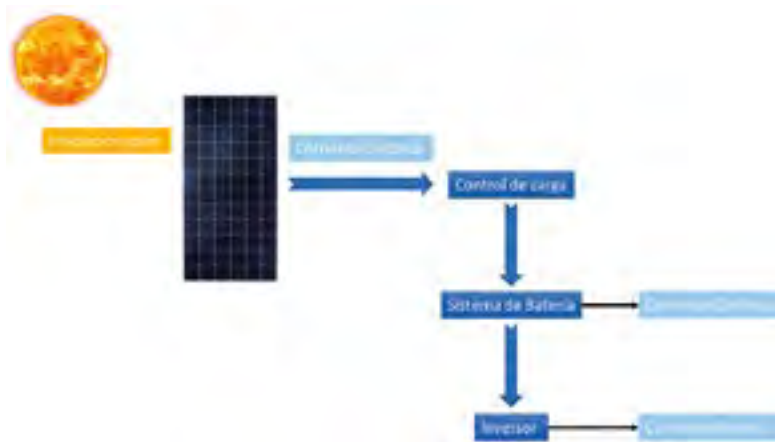


Fig. 3 Esquema del funcionamiento eléctrico de un sistema fotovoltaico.

2 TIPOLOGÍA DE MATERIALES, PANELES SOLARES Y ARQUITECTURA DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Un módulo fotovoltaico es un dispositivo que convierte la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Consiste en un conjunto de celdas solares conectadas entre sí, que generan una corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar.

Las celdas solares que componen el módulo fotovoltaico están hechas de silicio u otro material semiconductor similar, y están diseñadas para absorber la energía de la luz solar y liberar electrones, generando así una corriente eléctrica continua.

Los módulos fotovoltaicos se utilizan comúnmente para generar energía eléctrica en sistemas de energía solar fotovoltaica, tanto a nivel industrial como en aplicaciones residenciales y comerciales. También se utilizan en dispositivos portátiles, como calculadoras solares y cargadores de batería solares.

Los materiales utilizados en la fabricación de células fotovoltaicas son los siguientes:

- *Silicio*: La fabricación de células solares es muy compleja ya que, la materia prima es la arena común (SiO_2), que debe ser procesada para extraer el O₂ que contiene y donde el silicio resultante sufre un complejo proceso de purificación. El producto resultante pasa a otra fábrica donde se transforma en placas de Si fotovoltaicas, de esta pasa a una tercera donde se efectúan las operaciones fisicoquímicas de formación de campo eléctrico interno y de formación de electrodos metálicos.
- *Teluro de Cadmio*: Este material es muy tóxico ya que el cadmio es un químico peligroso.
- *CIS (cobre e indio)*: Estos módulos son de lámina delgada y, por lo tanto, son muy eficientes. El coste de estos paneles fotovoltaicos es elevado por los materiales utilizados.

Existen varias tecnologías utilizados en la fabricación de paneles solares. Algunos de los más comunes se enumeran a continuación:

- *Paneles solares de silicio cristalino*: Son los paneles solares más comunes y se componen de células solares de silicio cristalino. Estas células son de dos

tipos: monocristalinas o policristalinas. Las células monocristalinas se fabrican a partir de un solo cristal de silicio, lo que las hace más eficientes pero también más costosas. Las células policristalinas se fabrican a partir de varias piezas de silicio fundido juntas, lo que las hace menos eficientes pero más económicas.

En concreto, destacan las siguientes características:

- **Monocristalinos:**
 - » Son las más eficientes.
 - » El coste en mercado es mayor debido a su proceso de fabricación.
 - » Se distinguen por su forma de rombo, siendo esta figura la más eficiente para la captación de energía.
 - » Obtienen más potencia en el mismo espacio.
- **Policristalinos:**
 - » Son menos eficientes.
 - » Son más económicos.
 - » Tienen la ventaja de que se reduce el espesor hasta algunas micras.
 - » El proceso de elaboración no es tan complejo.
- *Paneles solares de película delgada:* Se fabrican depositando una capa de material fotovoltaico sobre un sustrato, como vidrio o metal. Estos paneles son menos eficientes que los de silicio cristalino, pero son más flexibles y ligeros, lo que los hace ideales para aplicaciones de baja potencia, como la carga de dispositivos electrónicos.
- *Paneles solares bifaciales:* Son paneles que pueden generar energía en ambos lados, lo que aumenta su eficiencia. Estos paneles suelen estar compuestos por células solares de silicio cristalino y tienen una capa transparente en la parte posterior para permitir que la luz se refleje y se capture desde ambos lados.
- *Paneles solares de concentración:* Utilizan lentes o espejos para concentrar la luz solar en células solares pequeñas y altamente eficientes. Estos paneles son más costosos y requieren una instalación más especializada, pero son adecuados para aplicaciones en áreas con alta radiación solar.

Los paneles fotovoltaicos se pueden agrupar de varias maneras, dependiendo del tipo de sistema solar que se esté utilizando y del objetivo de la agrupación. En general, el agrupamiento de los paneles fotovoltaicos se realiza para maximizar la eficiencia y el rendimiento del sistema solar, y para satisfacer las necesidades específicas del usuario o la aplicación.

A continuación se detallan las diferentes agrupaciones de paneles fotovoltaicos:

- *En serie:* Los paneles solares se conectan en serie para aumentar la tensión del sistema solar. En este caso, la corriente se mantiene constante mientras que la tensión se suma en cada panel. Esto es beneficioso para sistemas que requieren una alta tensión de salida, como aquellos que alimentan bombas de agua o luces LED.
- *En paralelo:* Los paneles solares se conectan en paralelo para aumentar la corriente del sistema solar. En este caso, la tensión se mantiene constante mientras que la corriente se suma en cada panel. Esto es beneficioso para sistemas que requieren una alta corriente de salida, como aquellos que alimentan motores eléctricos.
- *En serie-paralelo:* Los paneles solares se pueden conectar en serie y en paralelo para aumentar tanto la tensión como la corriente del sistema solar. En este caso, los paneles se agrupan en subconjuntos en serie y luego se conectan en paralelo entre sí. Esta es la forma más común de agrupación de paneles solares para sistemas de energía solar residencial y comercial.
- *Según la orientación:* Los paneles solares también se pueden agrupar según su orientación. Si se colocan en la misma dirección y ángulo, se dice que están orientados en la misma dirección. Si se colocan en diferentes direcciones y ángulos, se dice que están orientados de manera diferente. La orientación de los paneles solares puede afectar la cantidad de energía solar que reciben y, por lo tanto, la cantidad de energía eléctrica que producen.

Un panel solar y un módulo fotovoltaico son esencialmente lo mismo, y a menudo se utilizan indistintamente. Ambos términos se refieren a un dispositivo que convierte la luz solar en electricidad utilizable mediante la tecnología fotovoltaica.

Sin embargo, técnicamente hablando, un panel solar puede referirse a un conjunto de módulos fotovoltaicos conectados entre sí, mientras que un

módulo fotovoltaico se refiere a una unidad individual que consta de varias celdas solares.

En resumen, los módulos fotovoltaicos son los componentes básicos que conforman los paneles solares, y los paneles solares son la combinación de varios módulos fotovoltaicos para crear un sistema completo de generación de energía solar.

Los módulos fotovoltaicos son un conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre sí que están protegidas por una cubierta superior y otra inferior además de un marco exterior metálico, dándole protección mecánica y contra agentes externos como el viento o el agua. De esta forma se garantiza que no se modifiquen las propiedades de las células y no queden expuestas a procesos de oxidación dañando a la célula.

En la siguiente imagen se puede observar de qué manera está estructurado un panel y en qué forma se agrupan diferentes paneles.

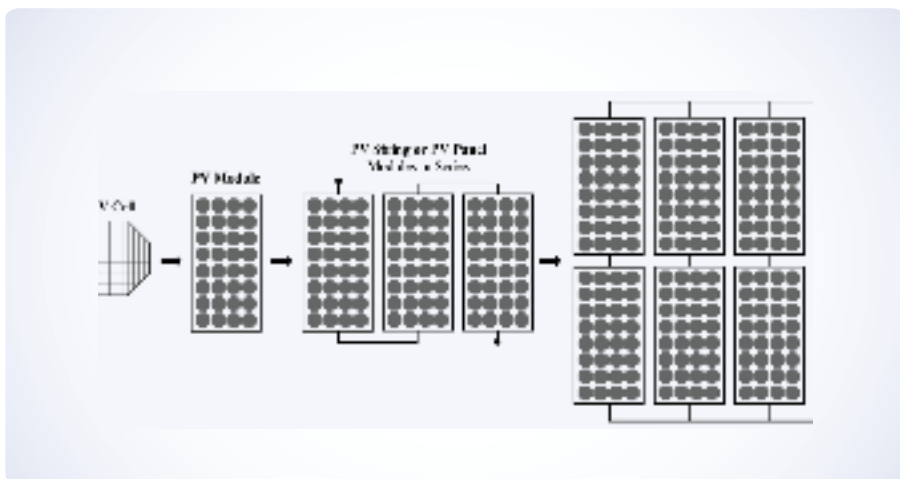


Fig. 4 Distribución de los paneles solares.

2.1 PARTES DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

Un panel fotovoltaico está compuesto por varias partes que trabajan juntas para convertir la luz solar en electricidad.

Las principales partes de un panel fotovoltaico son las siguientes:

- *Cubierta frontal de vidrio*: Es la capa superior transparente que cubre las celdas fotovoltaicas, dispone de alta transmisión para proteger el panel de la intemperie y dejar pasar la máxima radiación solar posible. Este vidrio también ayuda a concentrar los rayos solares en las células fotovoltaicas.
- *Encapsulado*: Este material se encarga de proteger las células solares y sus contactos. Los materiales empleados (etil-vinil-acetileno o EVA) proporcionan una excelente transmisión de la radiación solar, así como una nula degradación frente a las radiaciones ultravioletas. El EVA es un polímero termoplástico de etileno y acetato de vinilo, que actúa como aislante térmico y transparente para dejar pasar los rayos solares hasta las células fotovoltaicas. Además, aporta cohesión al conjunto del panel al rellenar el volumen existente entre las cubiertas frontal y trasera, amortiguando las vibraciones e impactos que se pueden producir. Sin embargo, se pueden encontrar problemas importantes que presenta este tipo de material donde tiene una excesiva plasticidad y gran adherencia al polvo, lo que provoca una disminución en la transmisibilidad a la radiación solar y, por lo tanto, disminuye la vida útil del panel solar.
- *Celdas fotovoltaicas*: Son las partes fundamentales del panel, están hechas de silicio y son las encargadas de transformar la energía luminosa del sol en electricidad.
- *Lámina trasera*: Es una capa de material aislante que se coloca en la parte posterior del panel para proteger las celdas fotovoltaicas de la humedad y otros elementos ambientales. Aunque se suele utilizar una capa de un polímero para este propósito, algunos paneles solares también pueden incluir una capa trasera de vidrio. Las ventajas del vidrio en la parte trasera de un panel fotovoltaico incluyen:
 - » Mejora de la durabilidad: El vidrio es un material duradero y resistente a la intemperie que puede proteger mejor las células solares de los impactos y otros daños.
 - » Mejora del rendimiento: El vidrio puede ayudar a reducir la reflectancia de la luz y mejorar la transmisión de la luz a través del panel, lo que aumenta la eficiencia de la célula solar.
 - » Mejora de la estética: El vidrio puede proporcionar una apariencia más uniforme y limpia en la parte trasera del panel, lo que puede ser beneficioso desde el punto de vista estético.

- » Mejora del aislamiento térmico: El vidrio ayuda a mejorar el aislamiento térmico de la célula solar, lo que puede ser beneficioso en climas fríos o calientes para mantener una temperatura óptima en las células.
- » Mejora de la seguridad: El vidrio es un material más resistente al fuego y a la propagación de llamas, en caso de incendio por un corto circuito dentro del panel, retarda que el polímero pueda propagar el incendio por goteo sobre envolventes del edificio, lo que puede aumentar la seguridad en caso de incendio.
- **Marco:** Es la estructura de soporte del panel. Se fabrica generalmente en aluminio anodizado, que aporta robustez al conjunto y facilita su montaje en estructuras. Se utiliza para fijar las celdas fotovoltaicas y protegerlas de la intemperie.
- **Caja de conexiones y cableado:** Parte del panel solar utilizado para extraer la electricidad generada en este tipo de instalación. Es el conjunto de cables que conectan las celdas fotovoltaicas a los terminales del panel y permiten que la electricidad generada por el panel se transmita a los dispositivos que la utilizan.

ESTRUCTURA DEL PANEL

Cristal delantero (Vidrio flotante 3,0 –3,3 mm)
Contacto TCO (Óxido Transparente Conductor)
Tipo de célula (material FV) Unión simple a-Si
Encapsulado(Polivinil de Butiral(PVB))
Cristal trasero (Vidrio templado de 3,2 mm)



Fig. 5 Estructura y componentes de un panel fotovoltaico.

2.2 ARQUITECTURA Y ELEMENTOS DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Una instalación fotovoltaica consta de varios elementos principales, que son:

- *Paneles solares*: Son los componentes más visibles y reconocidos de una instalación fotovoltaica. Los paneles solares convierten la energía solar en electricidad de corriente continua (CC). Se utilizan agrupados formando playas de paneles que pueden estar conectados en serie y paralela con armazón de montaje.
- *Inversor*: Se encarga de convertir la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA). Este inversor debe cumplir unas condiciones determinadas, de manera que la energía vertida a la red sea de forma adecuada. Frecuencia de 50 Hz y con una onda senoidal (modulaciones de la onda alterna de salida).
- *Baterías*: En una instalación fotovoltaica conectada a la red, no se suelen utilizar baterías, ya que la electricidad que no se consume se vierte a la red. Sin embargo, en una instalación autónoma, las baterías son necesarias para almacenar la energía generada durante el día para poder utilizarla durante la noche.
- *Cableado y conectores*: Los componentes principales del cableado de un sistema fotovoltaico en corriente continua incluyen los conectores, las cajas de conexiones y el cableado en corriente continua (CC) hasta el inversor, interruptor principal. Los paneles solares, el inversor y las baterías deben estar conectados mediante cables y conectores adecuados para garantizar un flujo de energía seguro y eficiente.
- *Estructura de montaje*: Se utiliza para fijar los paneles solares en su lugar y garantizar que estén orientados correctamente para aprovechar al máximo la energía solar.
- *Medidor bidireccional*: La caja de medidores con distribución de los circuitos eléctricos es una parte esencial de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Se utiliza en una instalación fotovoltaica conectada a la red para medir la cantidad de electricidad que se consume y la cantidad que se vierte a la red. En esta caja se encuentran los medidores de entrega y recepción de energía, así como los dispositivos de protección, conexión y desconexión del sistema fotovoltaico. Los medidores de entrega y recepción miden la cantidad de energía que se produce y la cantidad de energía que se consume. El medidor de entrega mide la cantidad de energía que se está

entregando a la red eléctrica desde el sistema fotovoltaico, mientras que el medidor de recepción mide la cantidad de energía que se está recibiendo de la red eléctrica para complementar la energía producida por el sistema fotovoltaico. En la caja de medidores con distribución de los circuitos eléctricos, también se encuentran los dispositivos de protección eléctrica, como los interruptores automáticos o los fusibles, que se utilizan para desconectar el sistema en caso de sobrecargas o cortocircuitos. En cuanto a la distribución de los circuitos eléctricos, esta caja también puede contener los dispositivos de distribución que se utilizan para dirigir la energía producida por el sistema fotovoltaico a los diferentes circuitos eléctricos de la edificación.

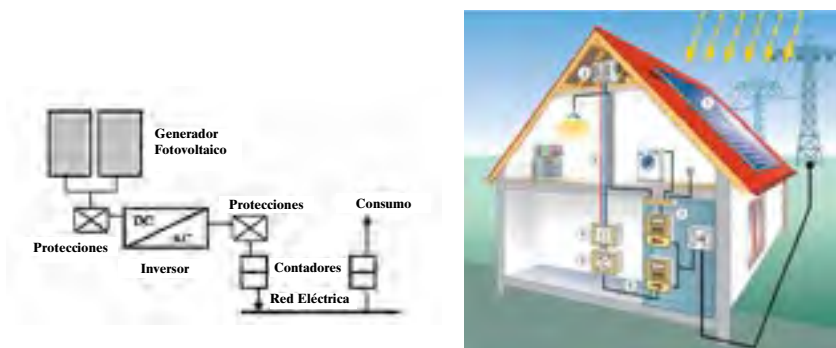


Fig. 6 Esquema de funcionamiento de instalación fotovoltaica.

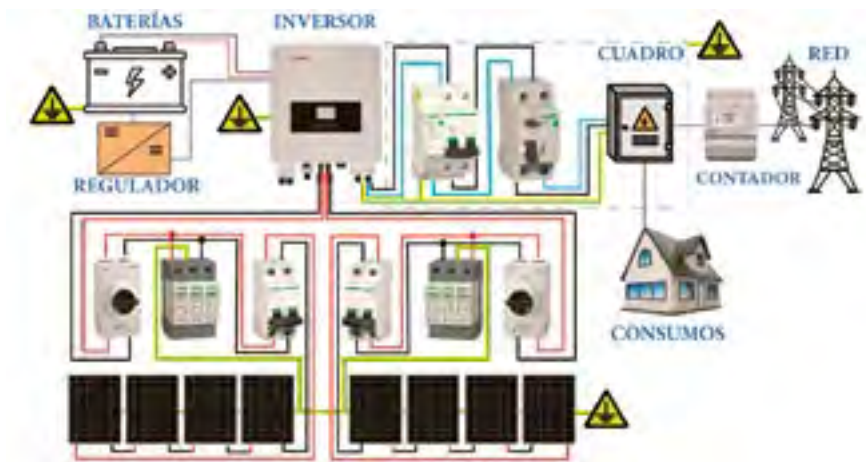


Fig. 7 Esquema general del sistema fotovoltaico conectado a la red.

2.3 INVERSORES DE CORRIENTE CONTINUA EN CORRIENTE ALTERNA

Los inversores de corriente continua a corriente alternan son componentes esenciales en las instalaciones fotovoltaicas, ya que convierten la energía eléctrica generada por los paneles solares, que es de corriente continua, en corriente alterna que es la que se utiliza en la red eléctrica convencional.

Los inversores de corriente también cumplen otras funciones importantes, como garantizar la seguridad de la red eléctrica al controlar la cantidad de energía que se vierte en ella, y monitorear y optimizar el rendimiento de la instalación fotovoltaica.

Existen varios tipos de inversores de corriente en el mercado, pero los más comunes en las instalaciones fotovoltaicas son los inversores de cadena, los inversores centrales y los microinversores. Los inversores de cadena son los más económicos y populares, pero tienen la limitación de que si uno de los paneles solares de la cadena falla, toda la cadena se ve afectada. Los inversores centrales son más adecuados para instalaciones grandes y permiten una mayor flexibilidad en el diseño de la instalación, pero tienen un mayor coste y una menor eficiencia energética. Los microinversores son más costosos que los otros dos tipos, pero tienen la ventaja de maximizar la producción de energía de cada panel solar individual.

Las principales características de los inversores son las siguientes:

- Como se ha nombrado anteriormente, su principal función es la transformación de corriente continua a corriente alterna.
- Optimizar la producción de energía generada por las placas solares, maximizando el rendimiento del sistema.
- Contienen equipos de protección, los cuales llevan un seguimiento del rendimiento y actividad eléctrica para que se paralice la producción de energía en caso de que se produzca algún fallo en el sistema o incluso la aparición de un cortocircuito.

Dentro de los inversores que están conectados al red eléctrica se puede distinguir distintas tecnologías y funciones que presenta cada una de ellas:

- *Inversor String (de cadena)*: Es el inversor estándar. Se utiliza cuando los paneles solares se encuentran conectados en serie y la energía se envía a un único inversor. Dicho dispositivo es el más económico y, además, el mantenimiento es sencillo y son fáciles de reconocer dentro del sistema.

Por otra parte, al ser un único inversor, se produce tanta electricidad útil como la placa solar que menos produzca, es decir, si alguna placa solar se ve afectada por alguna sombra u objeto, la potencia entera del ramal se ve reducida a la potencia del panel. Como consecuencia, el inversor string no sería la mejor opción en caso de que los paneles estuvieran dispuestos con diferentes orientaciones.

- *Microinversor*: Este dispositivo se sitúa en cada una de las placas solares conectadas al sistema fotovoltaico. Son muy eficientes porque producen energía incluso si uno de los paneles solares no funcionase. Sin embargo, esta tecnología es menos económica y al instalarse en la cubierta son más difíciles de reparar en caso de avería.
- *Optimizador de potencia*: El optimizador de potencia es un complemento para el clásico inversor (string). Igual que el microinversor, se instala en las cubiertas de los edificios en cada placa solar, con la diferencia de que envía la energía a un inversor centralizado. La ventaja de este dispositivo es controlar cada placa solar para que sean más eficientes.



Fig. 8 Inversor de cadena.

Por otro lado, existen diversos tipos de inversores donde el sistema fotovoltaico esté aislado de la red eléctrica, es decir, mediante almacenamiento de energía en baterías:

- *Inversores de instalaciones fotovoltaicas aisladas*: Estos inversores son únicos y exclusivos para instalaciones que no estén conectados a la red eléctrica.
- *Inversor cargador*: Se incorpora un cargador como fuente de energía auxiliar. Al igual modo que el anterior inversor, solo es compatible para instalaciones que no estén conectados a la red eléctrica.
- *Inversor híbrido*: Este tipo de inversor puede utilizarse tanto a las instalaciones no conectadas a la red eléctrica, como para las que sí lo están.

2.4 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA BATERÍAS

Los sistemas fotovoltaicos utilizan principalmente como medio de almacenamiento de energía, baterías o acumuladores fotovoltaicos, debido al desplazamiento temporal que puede existir entre los periodos de generación (durante el día) y los periodos de consumo (por la noche), permitiendo la operación de las cargas cuando el generador fotovoltaico por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo. Las baterías se utilizan generalmente en la mayor parte de los sistemas fotovoltaicos autónomos y, en general, no se emplean en sistemas conectados a la red eléctrica.

Se emplean varios tipos de baterías en los sistemas fotovoltaicos, pero las más comunes son las siguientes:

- *Baterías de plomo-ácido*: Son las más utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas debido a su bajo coste. Estas baterías pueden ser de dos tipos: inundadas o selladas. Las baterías inundadas requieren de mantenimiento regular, mientras que las baterías selladas no requieren de dicho mantenimiento.
- *Baterías de iones de litio*: Estas baterías tienen una alta eficiencia energética, mayor vida útil, menor peso y tamaño en comparación con las baterías de plomo-ácido, pero su costo es mayor.
- *Baterías de flujo*: Este tipo de baterías tienen la ventaja de ser muy duraderas, con una vida útil de hasta 20 años, y son capaces de almacenar grandes cantidades de energía. Además, son reciclables y no generan residuos tóxicos.

La elección de la batería adecuada para un sistema fotovoltaico dependerá de factores como la capacidad de almacenamiento requerida, la duración

de vida útil, el coste y las condiciones ambientales en las que se utilizará el sistema.



Fig. 9 Batería de plomo-ácido.

2.4.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

La gran mayoría de las baterías del mercado son de plomo-ácido (Pb-a), que se adaptan adecuadamente al sistema fotovoltaico. Existen baterías de plomo-cadmio (Pb-Ca) y plomo-antimonio (Pb-Sb). Las primeras necesitan un menor mantenimiento y tienen menor autodescarga, mientras que las segundas se deterioran menos en el ciclo diario de carga y descarga y presentan mejores prestaciones para niveles bajos de carga.

Se suelen utilizar dos tipos de baterías: plomo-ácido y níquel-cadmio. Debido a motivos de coste, es más habitual la utilización de plomo-ácido, siendo las baterías de níquel-cadmio más utilizadas en sectores profesionales. Las baterías de níquel-cadmio presentan una serie de ventajas como la posibilidad de sufrir descargas completas, permanecer largos periodos en baja carga sin sufrir deterioro y menor necesidad de autodescarga y mantenimiento.

La capacidad de un grupo de baterías conectadas en serie es igual a la capacidad de cada uno de los elementos que lo componen. Si se conectan en

paralelo se suma la capacidad de sus elementos. Por lo tanto, la capacidad necesaria para un sistema fotovoltaico se calcula en función de los consumos y número de días de autonomía del sistema.

Se debe tener en cuenta la importancia del dimensionado del sistema de acumulación formado por baterías con relación al generador fotovoltaico ya que, un exceso de capacidad de almacenamiento respecto de la capacidad de generación del sistema fotovoltaico daría lugar a que la batería tendría dificultades para poder cargarse completamente. Por el contrario, una baja capacidad de batería daría lugar a poca autonomía y se correría el riesgo de quedarse sin suministro de energía en caso de ausencia de radiación solar.

La evolución de la energía fotovoltaica puede atribuirse al desarrollo individual de cada uno de los componentes del sistema. Sin embargo, el almacenamiento de la energía sigue basándose en gran medida en baterías de plomo-ácido por lo que, no ha experimentado grandes cambios en las últimas décadas.

2.4.2 BATERÍAS DE ION LITIO

Las baterías de ion litio tienen unas características tecnológicas cuyo potencial está revolucionando la industria fotovoltaica y las energías renovables en general.

El mercado fotovoltaico actual no es lo suficientemente rentable como para impulsar una nueva tecnología de baterías debido al alto coste de desarrollo. Sin embargo, para este tipo de almacenamiento estacionario, las baterías de ion litio pueden presentar dos características fundamentales para la evolución de este tipo de tecnología: un ciclo de vida más largo y un menor coste.

En diversos estudios se ha presentado el potencial para el uso de estas baterías como un almacenamiento primario en energías renovables. Las ventajas de las baterías de ion litio estriban en una vida útil más larga y mayores densidades de carga y potencia. Hay que destacar que actualmente, las baterías empleadas en sistemas fotovoltaicos no conectadas a la red, no tienen las características que puede presentar una batería ion litio. Además, las baterías ion litio son más ecológicas que las baterías de plomo-ácido, debido a la densidad de materias primas que se requiere para lograr la misma capacidad de almacenamiento de energía.

No obstante, se debe tener en cuenta los riesgos que las baterías de ion litio pueden acarrear pues son inestables, propensas a incendiarse y los

incendios que provocan son difíciles de controlar ya que liberan gases tóxicos letales, por lo que, se requieren más avances en dicha tecnología para lograr un mayor nivel de seguridad.

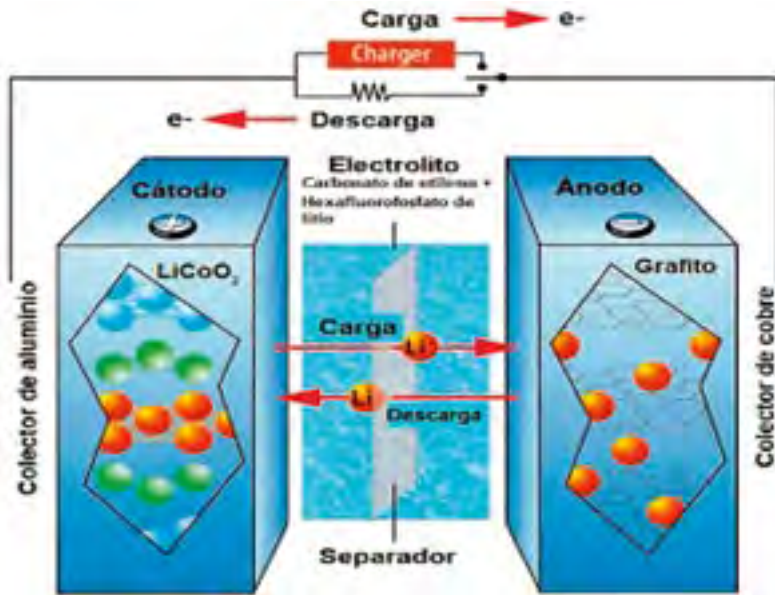


Fig. 10 Funcionamiento de batería ion litio.

2.4.3 BATERÍAS DE FLUJO

Las baterías de flujo son una opción interesante para ser utilizadas en sistemas fotovoltaicos debido a su alta eficiencia energética, su larga vida útil, su capacidad de almacenamiento y su capacidad para soportar un alto número de ciclos de carga y descarga.

Las baterías de flujo funcionan mediante la circulación de un electrolito líquido a través de una celda electroquímica. En comparación con otros tipos de baterías, las baterías de flujo tienen la ventaja de que el electrolito líquido puede ser almacenado por separado en grandes tanques, lo que permite un mayor control sobre la cantidad de energía almacenada y la capacidad de almacenamiento.

En un sistema fotovoltaico, las baterías de flujo pueden ser utilizadas para almacenar la energía generada durante el día para su uso durante la noche o en

momentos de alta demanda. Además, las baterías de flujo pueden ser combinadas con otros sistemas de almacenamiento, como baterías de iones de litio, para mejorar la eficiencia energética y la capacidad de almacenamiento.

Aunque las baterías de flujo son una opción atractiva para sistemas fotovoltaicos, también tienen algunas limitaciones. Por ejemplo, su coste es más elevado que el de las baterías de plomo-ácido o las baterías de ion litio. Además, su diseño y configuración pueden ser más complejos y requerir un mayor mantenimiento en comparación con otros tipos de baterías. Por lo tanto, la elección de la batería adecuada para un sistema fotovoltaico dependerá de una serie de factores, como la capacidad de almacenamiento, la duración de la vida útil y el coste, así como de las condiciones ambientales en las que se utilizará el sistema.

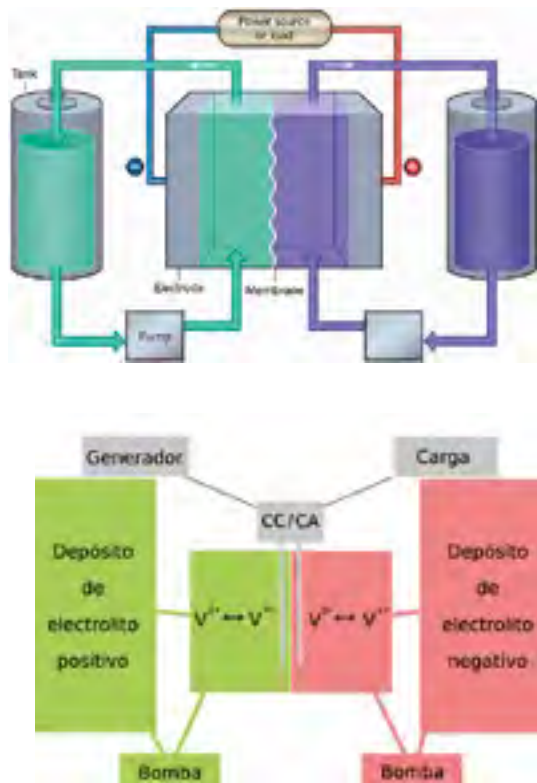


Fig. 11 Funcionamiento de batería de flujo.

3 IMPLANTACIÓN DE SISTEMA FOTOVOLTAICO

La implantación de un sistema fotovoltaico implica varios pasos importantes, que incluyen:

- **Evaluación del emplazamiento:** Se debe evaluar la viabilidad del entorno para determinar la cantidad de energía solar que se puede capturar. Se debe tener en cuenta factores como la orientación, la inclinación y la sombra de la ubicación.
- **Diseño del sistema:** El sistema debe diseñarse en función de la cantidad de energía que se necesita producir, la ubicación de los paneles solares y la capacidad de almacenamiento de las baterías.
- **Selección de los componentes:** Se deben seleccionar los componentes del sistema, como los paneles solares, los inversores, los controladores de carga y las baterías. Se debe asegurar que los componentes sean compatibles y que se ajusten al presupuesto y a las necesidades del usuario.
- **Instalación:** Se debe realizar la instalación del sistema siguiendo las instrucciones del fabricante y siguiendo las normas de seguridad. Esto puede incluir la instalación de paneles solares en la cubierta de las edificaciones o en una estructura independiente, la instalación de inversores, baterías y la conexión del sistema a la red eléctrica.
- **Conexión a la red eléctrica:** En algunos casos, es necesario conectar el sistema a la red eléctrica para poder vender el exceso de energía producida a la compañía eléctrica. Esto puede requerir la obtención de los correspondientes autorizaciones y la instalación de un medidor bidireccional.
- **Mantenimiento:** Se debe realizar un mantenimiento regular del sistema para garantizar su correcto funcionamiento.
- **Control del rendimiento:** Se debe supervisar el rendimiento del sistema para asegurarse de que está produciendo la cantidad de energía esperada y para identificar cualquier problema o fallo en el sistema.

La implantación de un sistema fotovoltaico requiere de un proyecto técnico donde se analicen además de los requerimientos propios de la implantación y su producción, los riesgos que pueda generar y se contemplen las medidas de seguridad a implantar.

3.1 IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN CUBIERTAS Y ENVOLVENTES DE EDIFICIOS

A la hora de instalar un sistema fotovoltaico sobre la cubierta de una edificación es importante determinar las características de los materiales de dichas cubiertas, tanto en edificaciones domésticas como industriales. Los materiales empleados en cubiertas pueden ser altamente combustibles, por lo que, determinará el nivel de riesgo a tener en cuenta en la implantación.

Las cubiertas de las naves industriales se están utilizando para la implantación de sistemas fotovoltaicos, por lo que se hace imprescindible el análisis de las diferentes tipologías de dichas cubiertas.

Existen diferentes tipos de cubiertas metálicas:

- *Cubiertas tipo sándwich (prefabricado)*: Están compuestas por dos capas metálicas donde en su interior se encuentra el aislante que puede ser de diferentes tipos:
 - » PUR: El material es poliuretano. Es un material aislante de origen orgánico, termoestable por lo que no se funde al calentarse.
 - » PIR: El material es poliisocianurato. Es similar al PUR pero presenta un mejor comportamiento frente al fuego.
 - » Lana de roca: Se trata de un producto inorgánico, no combustible y con baja producción de humos.



Fig. 12 Modelo de panel “sándwich” (prefabricado).

- *Panel sándwich “IN SITU”*
 - » Consiste en una superposición de dos capas de acero grecadas de unos 0,6 mm.
 - » Acabados galvanizado o prelacado.
 - » Perfil (omega) separador galvanizado y un aislante que puede ser de fibra de vidrio.
 - » Se realiza en la misma obra.
- *Cubierta tipo Deck*
 - » Está compuesta por un soporte base de chapa perfilada, aislante térmico e impermeabilización y/o protección pesada.
 - » El material de aislamiento utilizado puede ser de placa de lana de roca, de poliuretano o poliisocianurato de alta densidad.
 - » Para la impermeabilización suelen utilizarse láminas termo soldadas de diversos materiales bituminosos.



Fig. 13 Incendio fotovoltaico sobre panel no combustible.

Los paneles combustibles de cubierta en instalaciones fotovoltaicas pueden aumentar significativamente el riesgo de incendio si no se toman las

medidas de seguridad adecuadas. Estos paneles pueden estar compuestos por materiales inflamables, en caso de un incendio, pueden propagar las llamas rápidamente a través del techo.

Es importante que se realice una evaluación adecuada del riesgo antes de instalar los paneles fotovoltaicos y que se tomen las medidas necesarias para minimizar los riesgos de incendio.

3.2 CARGA DE FUEGO DE LOS MATERIALES

La carga de fuego de los materiales de las envolventes de las naves industriales es un factor importante a tener en cuenta en la seguridad contra incendios. La carga de fuego es la cantidad de calor que puede liberarse por unidad de área de un material combustible cuando se quema. Es una medida de la cantidad de energía que un material puede aportar a un incendio.

La carga de fuego depende de varios factores, como la densidad del material, su espesor, su contenido de humedad y su capacidad calorífica.

En el caso de las envolventes de las naves industriales, los materiales más comunes son el acero, el hormigón, el ladrillo y los paneles sándwich. Estos materiales tienen diferentes cargas de fuego, siendo el acero y el hormigón los materiales con mejor reacción al incendio, mientras que los paneles sándwich pueden tener cargas de fuego altas debido a su contenido de poliuretano.

La carga de fuego es uno de los factores influyentes en la severidad de un incendio, junto a su vez, con la ventilación, la configuración volumétrica del recinto y el aislamiento de las paredes, envolvente, fachada y cubierta.

Se calcula sumando la energía liberada por todos los materiales combustibles dentro del sector de incendios. La carga de fuego se puede expresar en términos tanto de calor como de energía liberada (MJ o MCal), normalmente, en términos relativos a superficie (densidad de carga de fuego del sector en MJ/m² o MCal/m²).

Este cálculo permite comparar actividades para determinar el peligro potencial en caso de incendio. En España, el RSCIEI *Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales*, utiliza el cálculo de la densidad de carga de fuego para determinar el nivel de riesgo intrínseco de los establecimientos industriales.

Los materiales combustibles empleados en los revestimientos de fachadas, paredes, techos y cubiertas pueden aumentar de forma significativa la carga de fuego del establecimiento y, por tanto, la severidad del incendio. La reglamentación de protección contra incendios requiere incluir la contribución de los materiales de construcción en el cálculo de la carga de fuego para determinar el nivel intrínseco de cada sector de incendio y del establecimiento en su conjunto.

Se debe tener en cuenta que la instalación fotovoltaica puede ser un factor iniciador del incendio pero también que incrementará la carga de fuego del establecimiento, por lo tanto, de igual manera su riesgo intrínseco. Además se debe de analizar la reacción al fuego y su velocidad de crecimiento del incendio de los elementos, involucrados en la instalación fotovoltaica, tanto de la envolvente del edificio como las zonas interiores por donde discurra cableado y equipamiento como como los inversores.

No existen requerimientos en este sentido en el RSCIEI *Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.*

El Código Técnico de la Edificación no plantea requerimientos para instalaciones fotovoltaicas en la envolvente solo por materia de altura de la edificación pide reacción al fuego de los materiales de revestimiento, Según el *Documento Básico de Seguridad Contra Incendios del Código Técnico de la Edificación (CTE)*, los requerimientos dependen de la altura del edificio, el tipo de fachada y la accesibilidad a la misma.

En la tabla 4.1 del *DBSI* del apartado S1, se establecen las condiciones que se deben cumplir frente a la reacción al fuego.

TABLA 1 - REVESTIMIENTOS SEGÚN DBSI.

Tabla 4.1 Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos

SITUACIÓN DEL ELEMENTO	REVESTIMIENTOS	
	De techos y paredes	De suelos
Zonas ocupadas ⁽⁴⁾	C-s2,d0	EFL
<i>Pasillos y escaleras protegidos</i> ⁽⁴⁾	B-s1,d0	CFL-s1
Aparcamientos y recintos de riesgo especial ⁽⁵⁾	B-s1,d0	BFL-s1
Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas), etc. o que siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio	B-s3,d0	BFL-s2 ⁽⁶⁾

La clasificación de la reacción al fuego en Europa se determina a partir de la normativa *UNE-EN 13501-1:2002, Euroclases*.

Dicha clasificación depende de los siguientes tres factores:

- Contribución a la propagación del fuego, donde se clasifica de la siguiente manera:
 - » A1 → No combustible y sin contribución al grado máximo al fuego.
 - » A2 → No combustible y sin contribución al grado menor al fuego.
 - » B → Combustible y contribución muy limitada al fuego.
 - » C → Combustible y contribución limitada al fuego.
 - » D → Combustible y contribución media al fuego.
 - » E → Combustible y contribución alta al fuego.
 - » F → Sin clasificar.

- Opacidad de los humos producidos dónde se clasifica de la siguiente manera:
 - » s1 → Baja opacidad de humos.
 - » s2 → Media opacidad de humos.
 - » s3 → Alta opacidad de humos.

- Caída de gotas o partículas inflamadas dónde se clasifica de la siguiente manera:
 - » d0 → No hay caída de gotas.
 - » d1 → Media caída de gotas.
 - » d2 → Alta caída de gotas.

4 PROPAGACIÓN DEL FUEGO POR FACHADA

Hoy en día, los paneles fotovoltaicos se pueden encontrar integrados en la estructura de la fachada, siendo parte de esta.

Debido a la suma importancia de la fachada del edificio como vía de propagación del fuego en caso de incendio, a continuación, se detallan los mecanismos físicos que explican dicha propagación, vinculados a su vez, a los parámetros arquitectónicos y constructivos de la fachada.

La propagación del fuego por fachada es una de las vías más rápidas de transmisión de dicho fenómeno. Constituye una ruta potencial de propagación a las plantas superiores e inferiores del edificio, pudiendo afectar también a edificaciones colindantes.

En la fachada convergen ciertos factores que favorecen la dinámica del incendio: la aportación de oxígeno por estar en contacto directo con el exterior, la verticalidad del medio de propagación, teniendo en cuenta que la pendiente aumenta la velocidad de propagación, el viento, las condiciones meteorológicas, etc. También contribuyen los fenómenos como el efecto chimenea, que facilita el movimiento ascendente de los flujos de calor y los humos, y el efecto Coanda, propio de los fluidos, por el que las llamas y gases calientes tienden a seguir la configuración geométrica de la fachada.

En un incendio se desarrollan corrientes convectivas, ya que el fuego tiene una trayectoria naturalmente ascendente, conocido como efecto de flotación “buoyancy effect”. Por este motivo, puede propagarse a través de la fachada, aun cuando los materiales de revestimiento sean incombustibles. El tamaño, la intensidad y la duración de la propagación del incendio, ya sea a través de ventanas o provocados por los propios paneles fotovoltaicos, depende de los siguientes factores:

- La carga combustible.
- El tamaño de la edificación.
- La configuración geométrica.
- Las condiciones de ventilación.

Además, los factores climatológicos, tales como la temperatura, la presión, la humedad relativa y el viento también influyen en los procesos que determinan el desarrollo y propagación del incendio.

La mejor manera de evitar este tipo de propagación es empleando material cuya contribución a la propagación del fuego sea muy limitada. El *CTE SI sección 2* estipula que los materiales que ocupen más del 10% de la superficie de la fachada deben tener una clasificación B-s3, d2, pero solo hasta una altura de 3,5 m. en zonas accesibles al público en edificios de hasta 18 m. de altura. Los edificios que superen esta altura deben cumplir el requisito de clasificación en su totalidad.

Este tipo de propagación puede producirse también en materiales cuya capa exterior no es combustible, pero en su interior contiene material de aislamiento el cual es totalmente combustible, como es el caso de los paneles sándwich, con chapa de acero en el exterior y material aislante en el interior. Por acción del fuego, el revestimiento del exterior pierde su integridad dando lugar a la propagación del incendio a través del material combustible del núcleo. Este tipo de producto se ha ido expandiendo en el sector de la construcción y normalmente, se suelen utilizar los paneles sándwich con aislamiento tipo PUR o PIR, los cuales son altamente combustibles, pero más económicos que el aislamiento de lana de roca.

Por lo tanto, la convivencia de una instalación fotovoltaica en este tipo de paneles da una falsa sensación de seguridad basada en la incombustibilidad de la chapa exterior, pero, cuando el incendio tiene unas proporciones considerables, la chapa no constituye ningún obstáculo y el núcleo combustible contribuye en la carga de fuego y propagación del mismo.

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de propagación es un asunto que se debería tener en cuenta dada la facilidad y la rapidez con la que puede ocurrir, contribuyendo, en algunos casos, de forma significativa a la difusión del fuego en los edificios. Las disposiciones contempladas en el *CTE* para limitar la propagación exterior del fuego son escasas y genéricas, lo que da lugar a un alto margen de interpretación de los requerimientos de protección.

Si bien el porcentaje de incendios que se produce en este tipo de instalaciones es muy bajo, todos los países donde se han hecho estudios estadísticos coinciden en la importancia de tener en cuenta la evolución al alza, teniendo en cuenta la velocidad de crecimiento de este tipo de instalaciones. En algunos casos, incluso se llega a definir de “dramática”. Parece interesante recomendar que, desde el punto de vista del legislador, deben valorarse cuántos accidentes de este tipo deben ocurrir y de qué dimensiones para que se actúe reglamentariamente.

Todos los países destacan el potencial efecto propagador de los incendios de este tipo de instalaciones sobre el edificio en el que están, preferentemente las cubiertas.

De todos los países para los que hemos analizado la bibliografía relativa a sus experiencias en torno a incendios para instalaciones fotovoltaicas, Italia dispone de elementos regulatorios que actúan directamente sobre la combustibilidad de los materiales de cubierta. Además, no podemos olvidar el potencial efecto reductor que, junto con otras medidas, llevó la implantación de este nuevo requerimiento legal a partir del 2011. La mayor parte de países inciden en la mayor regulación y profesionalización de los instaladores y mantenedores.

Asimismo, Estados Unidos y otros países, que utilizan el International Building Code como referencia, exigen la concordancia en las exigencias al fuego entre la instalación fotovoltaica y la cubierta donde va instalada, con el objetivo de que se asegure que cuando los bomberos acuden a atacar un incendio el sistema fotovoltaico instalado no contribuye a acelerarlo. “2012 IBC: 1509.7.2 Fire classification. Rooftop mounted photovoltaic systems shall have the same fire classification as the roof assembly required by Section 1505.”

En España, solo hemos encontrado una referencia, en las recomendaciones que realiza el cuerpo de Bomberos del Ajuntament, a la consideración de los materiales de construcción en fachadas para las instalaciones fotovoltaicas instaladas, indicando que se debe respetar la reacción al fuego de los materiales de fachada. Guia Tècnica – Criteri d'interpretació de la Normativa de Protecció Contra Incendis de Instal·lacions Fotovoltàiques del Ajuntament de Barcelona.

Existen estándares internacionales que ya consideran la necesidad de limitar la combustibilidad de los materiales con los que se construyen las cubiertas donde vayan a ubicarse instalaciones fotovoltaicas, como medida reductora del riesgo, como son FM, con su FM0115.

Teniendo en cuenta los anteriores antecedentes podemos confirmar los siguientes hechos:

- Que existe un riesgo potencial real de propagación del incendio de este tipo de instalaciones al edificio (preferentemente a través de cubierta y fachadas) y que para mantenernos en el lado de la seguridad, sería recomendable exigir que aquellas cubiertas que alojan una instalación fotovoltaica dispongan de soluciones de cubierta no combustibles.
- Que se confirma la tendencia al alza del número de instalaciones fotovoltaicas para los próximos años, y, así mismo, aumenta la posibilidad

de producirse posibles incendios que puedan propagarse a cubiertas y fachadas.

- Que existen varias referencias internacionales estudiadas que limitan o condicionan el grado de combustibilidad de los materiales de construcción del propio sistema, así como de las cubiertas y fachadas, como puede ser el caso del International Building Code en USA, o la “Guida per l’installazione degli impianti fotovoltaici - Edizione 2012 del Ministero dell’Interno de Italia.



5 ANTECEDENTES DE INCENDIOS EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

La Unión Española Fotovoltaica (*UNEF*) es la asociación sectorial de la energía solar fotovoltaica en España, con una representación de más de 400 empresas (más del 85 % de la actividad del sector en España), se constituye como el portavoz de la práctica totalidad de la industria: productores, instaladores, ingenierías, fabricantes de materias primas, módulos y componentes, distribuidores y consultores. Según los datos registrados por la *UNEF*, en el año 2018 se instalaron en España 261,7 MW de nueva potencia fotovoltaica, lo que supone un incremento del 94 % con respecto a los 135 MW instalados en 2017 y un importante crecimiento frente a los 55 MW registrados en 2016 y los 49 MW de 2015.

Todos estos antecedentes indican claramente que en los próximos años se verá multiplicado el número de instalaciones fotovoltaicas en las cubiertas de edificaciones y, en consecuencia, el aumento de los incendios en los que estas se ven afectadas, por lo que se hace fundamental profundizar en este aspecto.

Existe poca información sobre incendios en paneles fotovoltaicos instalados en techos de edificios. No se realizan estadísticas sobre los mismos, incluso el Centro Nacional de Datos de Incendios de Estados Unidos con gran tradición en registrar datos de incendios, sin embargo, los incendios en los paneles fotovoltaicos, son clasificados como “otras” causas.

Por ejemplo, un incidente importante fue la destrucción de un almacén de 30,000 m² en Nueva Jersey en 2013, en el que los bomberos decidieron no apagar el fuego en la cubierta debido al grave riesgo de la intervención.

Durante un periodo de diez años hasta 2017, las autoridades Japonesas registraron 127 incidentes relacionados con sistemas fotovoltaicos donde el fuego se propagó por la cubierta del edificio.

El grupo alemán Fraunhofer registró 350 incendios relacionados con sistemas fotovoltaicos durante los últimos 20 años hasta 2019, incluidos 10 casos donde se produjo la pérdida total de la edificación.

Se incluyen a continuación algunos detalles de incendios históricos en los que se vieron involucradas instalaciones fotovoltaicas. Dos de ellos han ocurrido en España.

- Bakersfield, California, 2009. Se produjo un incendio en una instalación fotovoltaica compuesta por 1 826 módulos instalados en la cubierta de un gran centro comercial.
- Recinto ferial *IFEPA* (Palacio de Ferias y Exposiciones de la Región de Murcia, España, 2013). Un cortocircuito originado en las placas solares que recubren los cerca de 8.000 m² de cubierta del recinto ferial *IFEPA* fue la causa de un incendio de gran magnitud que se originó en el edificio. El incendio que acabó calcinando toda la cubierta del recinto generó una gruesa columna de humo negro que era visible a varios kilómetros de distancia y que provocó la alarma en el municipio.



Fig. 14 Incendio en IFEPA.

- Entre 2011 y 2018, *Walmart* firmó un acuerdo con *Tesla* para instalar paneles solares en 244 cubiertas de sus más de 5.000 locales comerciales. A mediados de 2019, *Walmart* decidió denunciar a *Tesla* porque a lo largo de los años se habían producido numerosos incendios en sus almacenes, provocados por cortocircuitos en las instalaciones fotovoltaicas en cubierta.

- New Jersey, E.E.U.U., septiembre 2013. Un incendio tuvo lugar en un almacén frigorífico de 28.000 m² con más de 7000 módulos fotovoltaicos que cubrían la mayor parte de la cubierta. Según el informe de investigación, la cubierta combustible entró en ignición y permitió su propagación. La gran extensión de módulos fotovoltaicos por la cubierta dificultó el control del incendio por parte de los bomberos que tardaron 24 horas en extinguir el incendio, con resultado de destrucción total del edificio y de su contenido.



Fig. 15 Incendio en una tienda de Walmart.

- New Jersey, E.E.U.U., noviembre 2013. Un incendio iniciado en la cubierta de un almacén de distribución, cuya superficie era de unos 65.000 m², que contaba con 8.000 módulos fotovoltaicos instalados en la cubierta.
- Incendio en las naves logísticas de *Carrefour* en Azuqueca de Henares, España. El 13 de julio de 2016, se produjo un incendio en la cubierta de una nave de logística de *Carrefour*, en Azuqueca de Henares. El incendio se originó en el cableado de unas placas solares instaladas en la cubierta de la nave.

- Ichihara, Japón, septiembre de 2019. Un devastador incendio se produjo en la mayor planta fotovoltaica flotante del país, ocupando 18 hectáreas sobre un lago, y que cuenta con 50.000 paneles sobre el agua.
- Bristol, UK, 2022. El Museo *We The Curious* tenía instalado un sistema fotovoltaico que fue dañado a causado por aves, produciéndose un fallo eléctrico y por consecuencia el inicio del incendio en la edificación.

La magnitud del incendio y las labores de extinción destruyó un museo de ciencias para niños, el agua utilizada en la extinción ha causado grandes daños en el interior.

Casi 12 meses después, el centro de ciencias populares permanece cerrado con un programa de reparación de varios millones de libras en marcha en un edificio protegido.



Fig. 16 Incendio en el museo We The Curious.

Los datos que se pueden obtener no incluyen pérdidas asociadas con incendios relativamente pequeños. Parar el funcionamiento de una instalación, incluso después de un pequeño incidente, puede resultar costoso. Además, los sistemas fotovoltaicos instalados en techos o envolventes de edificios están expuestos a la intemperie, que también contribuyen al riesgo de incendio.

Los incendios por sistemas fotovoltaicos y sus consecuencias empiezan a ser un tema recurrente en las demandas en nuestros juzgados.

6 CAUSAS DE INCENDIO EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

Las instalaciones fotovoltaicas pueden presentar riesgos de incendio debido a diversos factores, para empezar la ausencia de un análisis de riesgos de incendio, realizada por expertos en ingeniería de seguridad contra incendios, en la instalación fotovoltaica así como su propagación al resto de la edificación lo que nos lleva como consecuencia a una falta total de diseño de medidas de seguridad tanto activas como pasivas de protección contra incendios.

Algunas de las causas más comunes de incendios en instalaciones fotovoltaicas son:

- **Sobrecalentamiento:** Las células solares y los cables eléctricos pueden sobrecalentarse si están expuestos a altas temperaturas o si hay una sobrecarga eléctrica.
- **Cortocircuitos:** Los cortocircuitos pueden ocurrir si los cables eléctricos están dañados o mal conectados, lo que puede provocar un sobrecalentamiento y un incendio.
- **Fallos en los inversores:** Los inversores convierten la corriente continua generada por las células solares en corriente alterna para su uso. Los fallos en los inversores pueden causar un sobrecalentamiento y un incendio.
- **Descargas eléctricas:** Las descargas eléctricas pueden ocurrir durante el mantenimiento o la instalación de los paneles solares, lo que puede provocar un incendio.
- **Fallos en las baterías:** Los sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías, pueden fallar y provocar un sobrecalentamiento y un incendio.
- **Fallos de productos derivados de mala calidad y mal diseño y ejecución.**

6.1 SOBRECALENTAMIENTO

La causa primaria que se ha identificado de incendios en los paneles fotovoltaicos es el fenómeno de puntos calientes en los módulos, sobrecalentando los componentes del sistema y la aparición de arcos eléctricos en corriente continua. El punto caliente se produce cuando existe un mal funcionamiento y es incapaz de producir energía derivado de un sombreado impredecible de placas solares tal como, acumulación de suciedad, vegetación, hojas o excrementos de pájaros, sin embargo, las células de alrededor continúan con la generación

de energía eléctrica, lo que provoca el calentamiento de las células solares que están fallando.

Es importante destacar que el sombreado se puede ocasionar en una parte parcial del módulo fotovoltaico o en ocasiones completo ya que, si una célula fotovoltaica se queda sombreada durante un tiempo determinado, provoca una variación en la curva característica I-V. La curva característica de un panel fotovoltaico, también llamada curva de intensidad-voltaje (abreviadamente curva I-V), representa los valores de tensión y corriente, medidos experimentalmente, de un típico panel fotovoltaico sometido a unas determinadas condiciones constantes de insolación y temperatura.

Por lo tanto la variación de la curva característica nos indicará como está funcionando el panel en relación con los valores obtenidos de forma experimental en laboratorio.

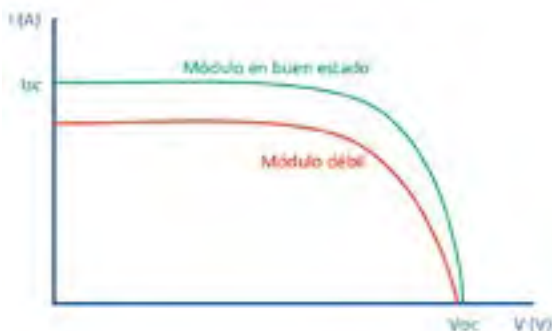


Fig. 17 Curva de intensidad de voltaje de un panel de una instalación fotovoltaica.

La energía es una función de la corriente y el voltaje, por lo que cualquier causa que reduzca la corriente o el voltaje generado por un sistema FV reducirá la energía que se produce. La forma o el perfil de la curva IV, por lo tanto, proporciona una indicación visual altamente efectiva del rendimiento de un módulo o cadena PV.

El trazado periódico de la curva IV es una herramienta muy efectiva para verificar el deterioro del rendimiento del sistema. Las mediciones de la curva IV también pueden resaltar el efecto del sombreado parcial o uniforme

y demostrar la mejora en el rendimiento después de la limpieza del módulo. Cuando nos encontramos un módulo solar fotovoltaico con un comportamiento cambiante a lo largo del tiempo, nos indica que tiene un problema de sombras.

Una célula sombreada puede no solo no producir corriente eléctrica, sino que, consumir la energía generada por las células colindantes, por lo que, este sombreado ocasiona dos consecuencias inmediatas:

- Una disminución de la potencia máxima de la célula, con la disminución de la producción que esto conlleva.
- Producir una circulación de corriente en sentido inverso en la célula, convirtiéndose en un elemento consumidor de energía en lugar de generador. Esta circulación inversa produce un sobrecalentamiento de la célula que puede llegar a ser elevado, produciendo un deterioro de la célula. Además, si la potencia no se disipa de forma uniforme en la célula pueden aparecer pequeñas zonas con temperaturas todavía más elevadas, dando lugar al fenómeno conocido como “punto caliente”.

La célula sometida al sombreado aumenta su temperatura dependiendo de diversos factores:

- Nivel o factor de sombreado: Afecta tanto a la cantidad de radiación que llega a la célula como a la cantidad de potencia que la célula sombreada va a disipar y por tanto al aumento de la temperatura.
- Número de células por diodo de paso: Determina el número de células que están entregando potencia a la célula sombreada y, por tanto, afecta a la cantidad de potencia que se va a disipar.
- Forma en la que se distribuye la corriente eléctrica en el interior de la célula: Existe una cierta relación entre la forma de distribución de la corriente en el interior de la célula y la forma de la curva I-V en inversa, afectando al aumento de temperatura.

La generación excesiva de calor del punto caliente puede llegar a que se inflamen los materiales próximos a este elemento como los polímeros de la placa fotovoltaica produciendo un incendio.

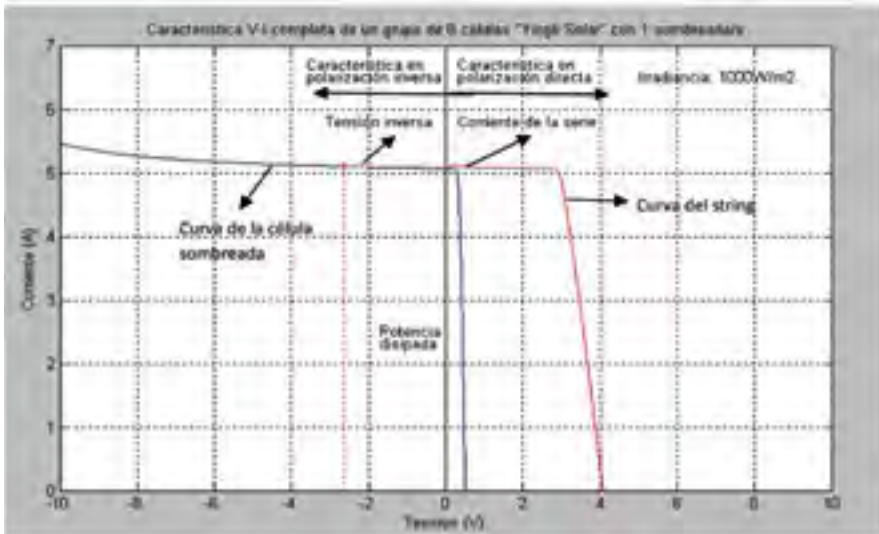


Fig. 18 Curva I-V en inversa.



Fig. 19 Incendio tras la formación de un punto caliente.

6.2 CORTOCIRCUITOS Y ARCOS ELÉCTRICOS

Los instalación fotovoltaica presenta tres características: componentes eléctricos ubicados en áreas expuestas a la intemperie y a menudo de difícil

acceso, carga de combustible adicional, que aumenta el peligro de propagación del fuego, e instalaciones eléctricas que son difíciles de aislar.

Estos sistemas están sujetos a fallos de tipo eléctricos como arcos eléctricos, cortocircuitos, corrientes inversas. Estos fallos pueden provocar puntos calientes, produciendo un incendio en el material combustible.

En un sistema fotovoltaico, la diferencia entre un cortocircuito y un arco eléctrico es la misma que en cualquier otro sistema eléctrico. Sin embargo, en un sistema fotovoltaico hay algunas consideraciones adicionales a tener en cuenta.

Un cortocircuito en un sistema fotovoltaico ocurre cuando hay un camino eléctrico directo y de baja resistencia entre los terminales positivo y negativo de un panel solar o entre dos paneles solares conectados en serie. Esto puede ocurrir debido a una conexión incorrecta o a un fallo en el aislamiento de los cables. Un cortocircuito en un sistema fotovoltaico puede dañar los cables, los inversores y otros componentes del sistema, y puede provocar un incendio.

Por otro lado, un arco eléctrico en un sistema fotovoltaico ocurre cuando hay una separación repentina de las cargas eléctricas en el aire debido a una sobretensión eléctrica o una mala conexión eléctrica.

Los arcos eléctricos en un sistema fotovoltaico pueden ocurrir en los puntos de conexión entre los paneles solares, entre los paneles solares y los inversores o en otros puntos del sistema eléctrico.

Un arco eléctrico es una descarga eléctrica de alta energía que ocurre cuando hay una separación repentina de conductores de cargas eléctricas en el aire o en otro medio aislante.

Esta separación puede ocurrir por:

- Sobretensión. Una sobretensión en el sistema puede hacer que el aislamiento del cable se rompa y se produzca un arco.
- Mala conexión. Una conexión defectuosa o una mala conexión eléctrica en el sistema puede provocar una separación de las cargas eléctricas y la formación de un arco eléctrico.
- Daño mecánico. El daño físico en los cables o en los componentes del sistema puede crear una separación de las cargas eléctricas y provocar un arco eléctrico.

- Fallo en el aislamiento. Si el aislamiento del sistema no está adecuadamente diseñado o se degrada con el tiempo, puede producirse una separación de las cargas eléctricas y formarse un arco eléctrico.
- Ambiente húmedo. La humedad en el ambiente puede aumentar la conductividad eléctrica del aire y aumentar el riesgo de arcos eléctricos.

Un arco eléctrico puede ocurrir en diferentes puntos de una instalación fotovoltaica, como por ejemplo:

- En el interior de un inversor fotovoltaico debido a un fallo interno en sus componentes eléctricos.
- En los conectores eléctricos de los módulos fotovoltaicos, si no están instalados correctamente o si presentan daños.
- En los cables eléctricos de la instalación, en caso de que estén sobrecargados o dañados.
- En los diodos de bloqueo de los módulos fotovoltaicos, si presentan daños o defectos.
- En los elementos de protección, como los fusibles, si no están dimensionados correctamente o si se han instalado de forma incorrecta.
- En los interruptores de protección, si se producen fallos de aislamiento en su interior.
- En las cajas de conexión de los módulos fotovoltaicos, si presentan defectos o si se han instalado de forma incorrecta.

El arco eléctrico produce un intenso flujo de calor que se concentra en un área muy pequeña, lo que puede provocar la fusión y vaporización de los materiales circundantes. Además, el arco eléctrico también produce luz intensa, ondas de presión y gases tóxicos que pueden ser peligrosos para la salud y la seguridad de las personas cercanas al arco.

La temperatura de un arco eléctrico en un sistema fotovoltaico puede ser extremadamente alta, alcanzando temperaturas de hasta 9000 °C. y es suficiente para derretir metales y materiales aislantes, en un sistema fotovoltaico es suficientemente como para fundir vidrio, cobre y aluminio e iniciar la combustión de los materiales circundantes

Los arcos eléctricos producidos en estos tipos de sistemas son altamente peligrosos y, además, difíciles de eliminar. En un conjunto fotovoltaico existen numerosas interconexiones o uniones que se han realizado mediante un

proceso de soldadura, como la terminación de un conector dentro de la caja de conexiones, cualquiera de las conexiones mencionadas anteriormente puede ser clave para la iniciación de arco eléctrico.

Además, hay que diferenciar un arco eléctrico producido en corriente continua o alterna porque se observan diferencias de las condiciones que se establecen. La corriente alterna tiene una forma de onda sinusoidal con respecto a la frecuencia de la red, pero en realidad se observa que tiene una forma de onda periódica. Es importante destacar que la forma de onda periódica tendrá un punto en el que la corriente es cero al pasar de fluir en diferentes direcciones. Los dispositivos de protección contra los sistemas de corriente alternan pueden detectar este punto en el que la corriente alterna es cero o próximo a este, para poder abrir los contactos y en este punto evitar la formación de arcos eléctricos. Sin embargo, la corriente continua fluye en una dirección y no presenta desviaciones, por lo que, no tendrá ningún punto donde se obtenga el valor cero o próximo. Por este motivo, es más complejo poder detectar la formación de un arco eléctrico. Los sistemas fotovoltaicos tienen un flujo continuo de corriente procedente de los módulos fotovoltaicos que no puede eliminarse desde la fuente, ya que es la luz solar. La cantidad de corriente es proporcional a la intensidad de la irradiación solar en las células fotovoltaicas.

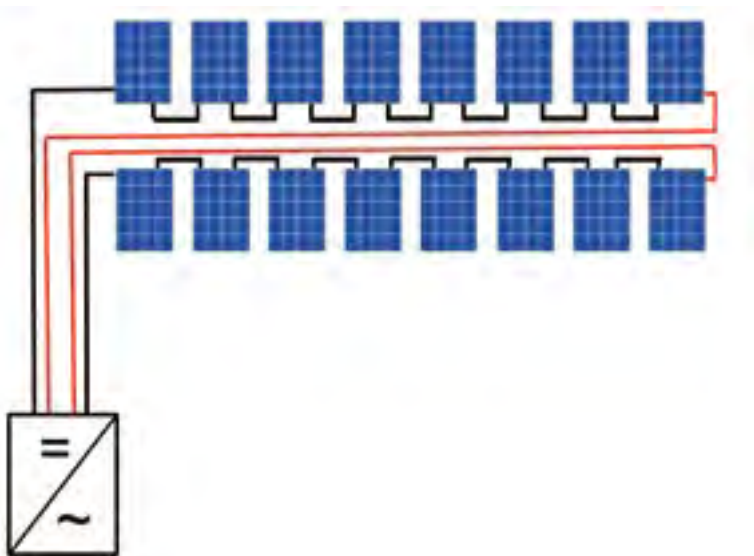


Fig. 20 Sistema solar de inversor string con cableado de CC sin protección.

Los fallos pueden ocurrir en cualquier parte del cableado de corriente continua desde los paneles solares instalados en la cubierta o la envolvente de la edificación, los aisladores de corriente continua, el cableado hasta el inversor que generalmente se instala junto al cuadro eléctrico de distribución principal.

Por otro lado, se tendrán en cuenta los arcos producidos según la disposición de los elementos en un circuito eléctrico, es decir, en paralelo o en serie.

- *En serie:* Se produce el arco en serie cuando se interrumpe una conexión mientras el panel fotovoltaico está produciendo corriente. Cualquier conexión en el circuito de corriente continua tiene el potencial de producir un fallo por arco de corriente continua. Estas conexiones pueden incluir uniones soldadas dentro del módulo fotovoltaico, conexiones en los cables, conectores utilizados en los cables conectados a los módulos fotovoltaicos, conexiones en aisladores de corriente continua, conexiones en el inversor, etc.

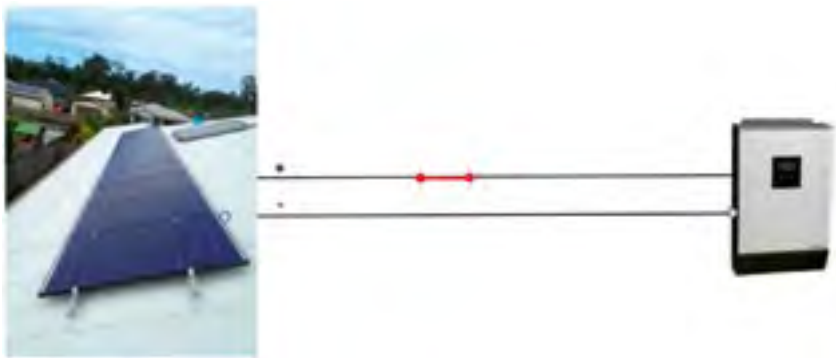


Fig. 21 Producción de un arco eléctrico en serie.

- *En paralelo:* Los arcos en paralelo ocurren cuando ocurre un fallo en el sistema de aislamiento y la corriente fluye entre positivo y negativo. A menudo a la hora de instalar un sistema fotovoltaico, la colocación del cableado con polaridad opuesta se sitúa muy cerca del uno del otro. El aislamiento que cubre los cables puede presentar fallos debido a diferentes factores, como por ejemplo la actuación de animales que muerden el cableado, roturas por deterioro ambiental al encontrarse a la intemperie, etc. Este tipo de fallos pueden continuar a lo largo de todo el trazado de los conductores, quemando los materiales que se encuentran a su paso.

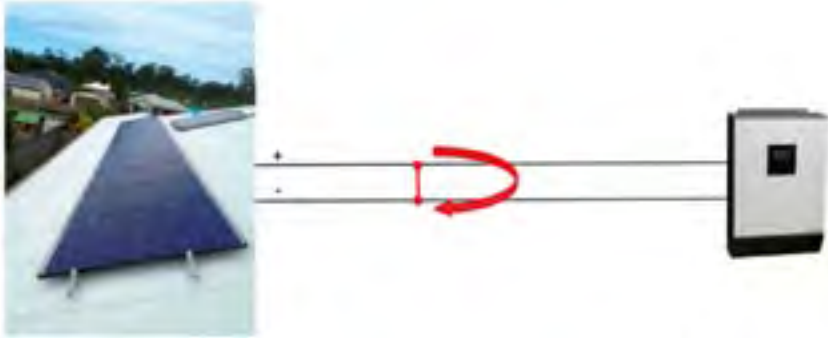


Fig. 22 Producción de un arco eléctrico en paralelo.

- *A tierra:* El fallo de un sistema de aislamiento a tierra puede producirse en diferentes partes, en el marco del módulo solar, el bastidor del panel solar o en cualquier otra superficie conectada a tierra.

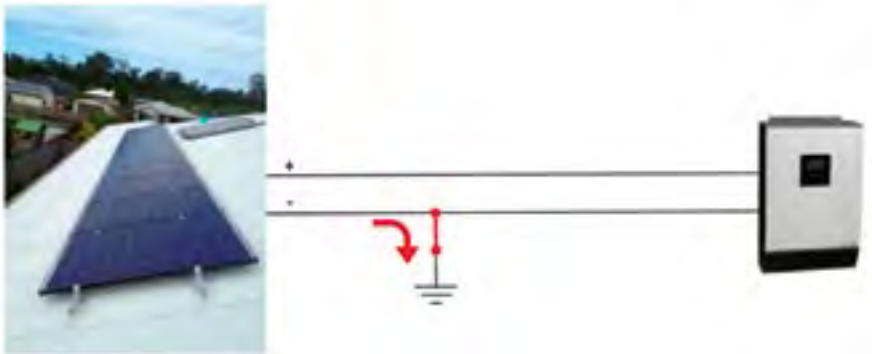


Fig. 23 Producción de un arco eléctrico a tierra.

Cuando se produce un incendio por causa de arco eléctrico de corriente continua, aunque se desconecte el inversor no se eliminará la tensión el cableado de corriente continua, los cuales se sitúan aguas abajo panel solar, ya que se encuentran activos siempre que incida el sol en el panel y no exista ningún método para aislar correctamente dicho cableado. Sin embargo, dependiendo de la posición donde ocurra el fallo, se podría actuar sobre el aislador de corriente continua, los aisladores de corriente continua se instalan en el

circuito eléctrico de la instalación fotovoltaica en puntos críticos donde se requiere una separación eléctrica, como entre los paneles solares y los cables eléctricos, entre los cables eléctricos y los inversores, y entre los inversores y los equipos de distribución eléctrica.

Estos aisladores suelen ser componentes de alta resistencia dieléctrica que están diseñados para soportar altos voltajes y corrientes eléctricas, y para evitar que la energía fluya de manera no deseada a través del sistema.

Hoy en día, existe una variedad de tecnologías que elimina el riesgo asociado a la prevención de dicho fenómeno. Se pueden encontrar algunos inversores que tienen incorporados detección de fallo por arco eléctrico, sin embargo, estos no detectan ni aíslan todos los tipos de fallos anteriormente mencionados. Dichos detectores funcionan mediante la identificación del ruido producido por un fallo de arco eléctrico en el cableado de corriente continua. Una vez que se detecta un arco, el circuito de corriente continua en el inversor se aislará. Esta tecnología extinguirá un arco en serie, pero no en paralelo ni por defecto de tierra.

Al igual que en cualquier otro circuito eléctrico, una ruta de baja resistencia a tierra puede provocar un sobrecalentamiento mediante arcos eléctricos llegando a causar un incendio. De las diferentes causas de incendio que se presentan en los sistemas fotovoltaicos es el fallo de conexión a tierra. Para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de la instalación fotovoltaica, se debe proporcionar un sistema de puesta a tierra adecuado. El sistema de puesta a tierra asegura que cualquier corriente eléctrica no deseada se desvíe al suelo en lugar de circular por el equipo o las personas en contacto con el equipo.

Los módulos fotovoltaicos deben estar diseñados y conectados de manera segura para garantizar que la energía fluya a través del circuito externo y para proporcionar una conexión segura y efectiva a tierra.

Además, se debe tener precaución en los sistemas incorrectamente instalados o defectuosos ya que, han sido la causa de varios incendios fotovoltaicos.

Es importante destacar que la probabilidad de que un fallo por arco de corriente continua se genere, aumenta a medida que la instalación fotovoltaica envejece. Esto se debe a que las uniones en el cableado de corriente continua se deterioran y corroen con el tiempo debido a las inclemencias temporales, heladas, nieve, lluvia y especialmente en zonas de ambientes agresivos como las cercanas al mar. Además, los sellados en aisladores y conductores se degradan, lo que permite la filtración de agua dentro del sistema.

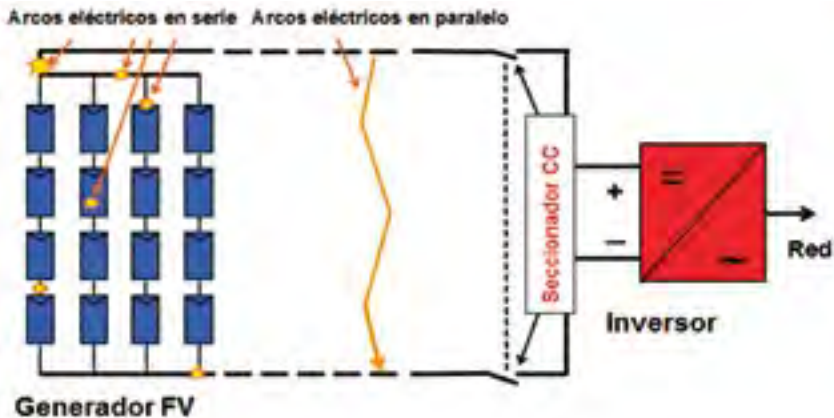


Fig. 24 Posible propagación de arcos eléctricos en serie y paralelo en una planta fotovoltaica.

6.3 FALLOS Y ARCOS DERIVADOS DE SUFRIR DAÑOS FÍSICOS

Los daños en los módulos fotovoltaicos pueden ocurrir debido a varios factores, como la exposición prolongada a condiciones climáticas extremas, como la lluvia, el granizo, la nieve o la humedad, o debido a vibraciones o golpes mecánicos, lo que puede provocar que las capas del panel fotovoltaico se separen produciendo delaminación.

En Japón se han registrado incendios en paneles fotovoltaicos derivados del comportamiento de aves, en concreto los cuervos atacan con piedras a los paneles fotovoltaicos tras verse afectados por los reflejos solares de los paneles.

La delaminación de un panel fotovoltaico se refiere a la separación o despegado de las capas de materiales que componen el panel. En los paneles solares, normalmente hay varias capas de materiales, como el vidrio, los materiales encapsulantes, las células solares y las capas posteriores, que se combinan para formar un panel.

La delaminación de un panel fotovoltaico puede tener un impacto negativo en la eficiencia del panel y en su capacidad para producir energía eléctrica. La delaminación puede permitir la entrada de agua, polvo y otros contaminantes en el interior del panel, lo que puede afectar la eficiencia de las células solares y reducir la vida útil del panel.

Una vez que la humedad ha penetrado en la capa protectora del panel solar y entra en contacto con el circuito interno, acelera seriamente el proceso de degradación de un módulo fotovoltaico.

Para evitar la delaminación de los paneles solares, es importante seleccionar paneles solares de alta calidad y adecuados para el entorno en el que se instalarán. Además, se deben seguir las recomendaciones del fabricante para el almacenamiento, el transporte la instalación y el mantenimiento de los paneles solares. También se deben realizar inspecciones regulares de los paneles solares para detectar cualquier signo de delaminación u otros problemas, y tomar medidas preventivas para abordarlos antes de que se conviertan en un problema más grave.

Las grietas y deslaminación en los paneles fotovoltaicos pueden aumentar el riesgo de incendios en un sistema fotovoltaico debido a varios factores:

- **Infiltración de humedad:** Las grietas en los paneles fotovoltaicos pueden permitir que la humedad penetre en el sistema. Si la humedad entra en contacto con los componentes eléctricos, puede provocar un cortocircuito y aumentar el riesgo de incendio.
- **Sobrecalentamiento:** Las grietas en los paneles fotovoltaicos pueden alterar el flujo de corriente eléctrica y provocar un aumento de la temperatura en el sistema. Si el sistema no está diseñado para soportar esta temperatura adicional, puede producirse un sobrecalentamiento y aumentar el riesgo de incendio.
- **Chispas eléctricas:** Las grietas en los paneles fotovoltaicos pueden producir chispas eléctricas si las cargas eléctricas se separan en las áreas cercanas a la grieta. Las chispas eléctricas pueden provocar un incendio si entran en contacto con materiales inflamables cercanos como los elementos polímeros del panel.

Otras circunstancias que pueden generar el calentamiento derivado de la no producción de energía eléctrica son desalineaciones de los paneles fotovoltaicos.

Las desalineaciones de los módulos fotovoltaicos se refieren a la falta de alineación adecuada de los paneles solares en un sistema fotovoltaico. Esto puede ocurrir debido a varias razones, como errores en el diseño e instalación del sistema, daños mecánicos en los paneles, cambios en la estructura del edificio donde se instalan los paneles solares, entre otros.



Fig. 25 Deslaminación en barra colectora del panel.

Si los paneles fotovoltaicos se desalinean, es decir, si pierden su alineación adecuada, pueden ocurrir varios efectos negativos en el sistema fotovoltaico. Algunos de ellos son:

- **Reducción en la producción de energía:** Los paneles solares están diseñados para recibir la máxima cantidad de luz solar posible. Si los paneles están desalineados, pueden recibir menos luz solar, lo que puede reducir la cantidad de energía eléctrica que se produce. Esto puede llevar a una reducción en la producción de energía del sistema fotovoltaico.
- **Corriente eléctrica excesiva:** Las desalineaciones de los módulos fotovoltaicos pueden provocar que una parte del sistema reciba una corriente eléctrica excesiva. Si la corriente eléctrica supera los límites del diseño, puede producirse un sobrecalentamiento y aumentar el riesgo de incendio.
- **Sobrecalentamiento:** Los paneles fotovoltaicos están diseñados para disipar el calor que se produce cuando la energía solar se convierte en energía eléctrica. Si los paneles están desalineados, puede haber una acumulación de calor en algunos puntos del sistema, lo que puede provocar un sobrecalentamiento. Esto puede dañar los componentes del sistema y reducir la vida útil del mismo.
- **Riesgo de incendios:** Si los paneles están desalineados, puede haber una acumulación de calor en algunos puntos del sistema, lo que puede aumentar el riesgo de incendios.

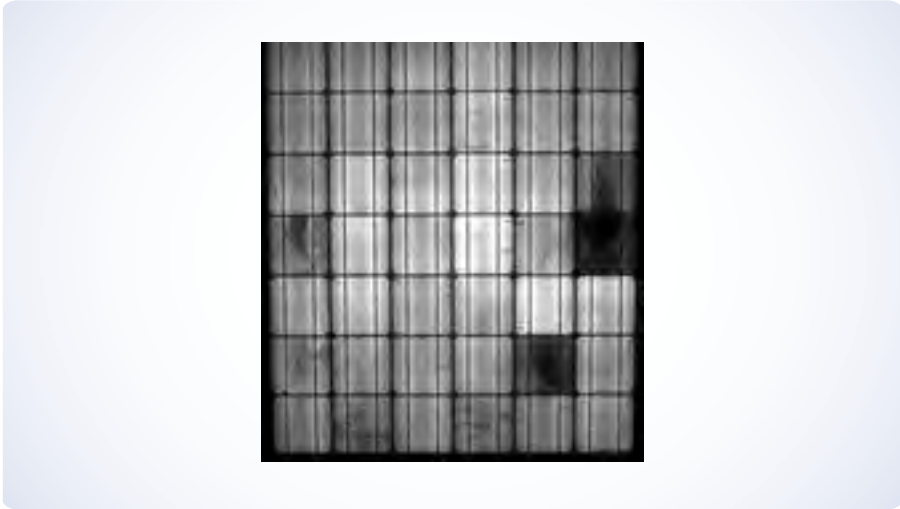


Fig. 26 Módulo con micro-fisuras y fracturas en celdas.

6.4 FALLOS EN LOS INVERSORES

Los inversores fotovoltaicos son uno de los componentes clave en un sistema de energía solar fotovoltaica, y como tal, pueden ser responsables de incendios. Algunas de las causas más comunes de incendios en inversores fotovoltaicos son las siguientes:

- **Sobrecalentamiento:** Si el inversor se sobrecalienta, puede provocar un incendio. Esto puede deberse a un diseño inadecuado del sistema, un funcionamiento prolongado en altas temperaturas o una ventilación inadecuada del inversor.
- **Fallos en los componentes eléctricos:** Si los componentes eléctricos dentro del inversor fallan, pueden producirse cortocircuitos que, a su vez, pueden provocar incendios.
- **Problemas de aislamiento:** El aislamiento eléctrico dentro del inversor es crucial para evitar descargas eléctricas. Si hay un fallo en el aislamiento, puede producirse una fuga de corriente eléctrica que genere calor y provoque un incendio.
- **Defectos de fabricación:** Si el inversor tiene un defecto de fabricación, puede fallar y provocar un incendio.

- Acumulación de polvo y la suciedad en el inversor y la flojedad en cables y conexiones.

6.5 DESCARGAS ELÉCTRICAS

Las descargas eléctricas son otra posible causa de incendios en sistemas fotovoltaicos. Esto puede ocurrir si hay una acumulación de electricidad estática en el sistema que luego se descarga en un cortocircuito. Algunas de las causas más comunes de descargas eléctricas en sistemas fotovoltaicos son las siguientes:

- **Mal diseño del sistema:** Si el sistema fotovoltaico no está diseñado correctamente, puede haber una acumulación de electricidad estática en ciertas áreas del sistema. Esto puede deberse a una mala elección de materiales o un diseño inadecuado de la ubicación de los componentes.
- **Condiciones climáticas extremas:** Las tormentas eléctricas y las descargas atmosféricas pueden causar una sobrecarga en el sistema fotovoltaico, lo que a su vez puede generar una descarga eléctrica.
- **Problemas de conexión:** Si las conexiones en el sistema fotovoltaico no se realizan adecuadamente, puede producirse una acumulación de electricidad estática.

Los incendios en sistemas fotovoltaicos también pueden ocurrir durante las operaciones de mantenimiento o montaje. Estos pueden ser causados por una variedad de factores, como errores humanos, equipos de mantenimiento defectuosos o falta de capacitación del personal.

Algunas de las causas específicas de incendios durante las operaciones de mantenimiento o montaje pueden incluir:

- **Cortocircuitos accidentales:** Durante las operaciones de mantenimiento o montaje, es posible que se produzcan cortocircuitos accidentales si se tocan los cables eléctricos con herramientas o equipo de metal.
- **Fallos en los equipos:** Si el equipo de mantenimiento o montaje no está en buenas condiciones o no se utiliza correctamente, puede producirse un fallo en el equipo que genere una chispa o un arco eléctrico.
- **Falta de capacitación:** Si el personal encargado de las operaciones de mantenimiento o montaje no está debidamente capacitado, puede cometer errores que generen un riesgo de incendio.

6.6 FALLOS EN LAS BATERÍAS

Los sistemas fotovoltaicos que incluyen baterías pueden presentar riesgos de incendio adicionales. Las baterías de almacenamiento de energía utilizadas en los sistemas fotovoltaicos son propensas a generar calor y pueden provocar un incendio.

Las causas de incendios en sistemas fotovoltaicos con baterías pueden incluir:

- **Sobrecarga:** Si las baterías se sobrecargan, pueden generar calor excesivo y provocar un incendio.
- **Descarga profunda:** Las descargas profundas pueden dañar las baterías y aumentar el riesgo de incendio.
- **Cortocircuitos:** Los cortocircuitos en las baterías pueden provocar un aumento repentino de la corriente eléctrica y generar calor suficiente para provocar un incendio.
- **Fallos en los sistemas de protección:** Si los sistemas de protección, como los interruptores de circuito y los fusibles, no funcionan correctamente, puede haber un riesgo de incendio.

6.7 FALLOS DE PRODUCTO, DISEÑO Y EJECUCIÓN

Los errores de fabricación en productos fotovoltaicos pueden afectar negativamente su rendimiento y durabilidad, y potencialmente causar problemas de seguridad y riesgo de incendio. Algunos de los errores más comunes incluyen:

- **Imperfecciones en las células solares:** Las células solares pueden tener defectos, como microfisuras, cortocircuitos que reducen su eficiencia y pueden generar calor excesivo que puede derivar en un incendio.
- **Problemas de encapsulación:** Las células solares se encapsulan en un material transparente para protegerlas y mantenerlas en su lugar. Si hay burbujas de aire, grietas o fugas en el material de encapsulación, el agua y el polvo pueden entrar y corroer las células solares. Además, puede producirse un sobrecalentamiento y eventual incendio si el material de encapsulación no resiste bien la temperatura.

- Problemas de soldadura: Las conexiones eléctricas entre las células solares pueden presentar soldaduras de manera incorrecta o defectuosa, lo que puede provocar un cortocircuito y un sobrecalentamiento que conlleva a un incendio.
- Problemas de calidad de los materiales: Si los materiales utilizados para la construcción de los paneles fotovoltaicos, como las láminas posteriores o los adhesivos, no cumplen con los estándares de calidad, pueden deteriorarse más rápidamente y reducir la eficiencia del panel. Además, si los materiales presentan un mal comportamiento al fuego, pueden facilitar la propagación de un incendio.
- Problemas de diseño: Un diseño incorrecto puede comprometer la durabilidad y seguridad del panel. Por ejemplo, la falta de ventilación adecuada para disipar el calor generado por el panel, puede dar lugar a un sobrecalentamiento que eventualmente produzca un incendio.
- Problemas de embalaje y transporte: Un embalaje deficiente y un transporte inadecuado pueden dañar los paneles fotovoltaicos y generar grietas, fisuras o daños eléctricos, lo que afecta su rendimiento y seguridad.

Es importante que los fabricantes de productos fotovoltaicos realicen controles de calidad rigurosos y pruebas de seguridad para garantizar que sus productos sean seguros y eficientes.

Además, la certificación y el cumplimiento de estándares de calidad y seguridad son importantes para evitar errores de fabricación. Se debe proporcionar formación detallada sobre todos los problemas presentes en las instalaciones fotovoltaicas tanto de certificaciones como calidades de equipos a los departamentos de compras de las empresas, el gran desconocimiento de los problemas que puede representar una mala elección del producto puede llevar a optar por la oferta de menor coste, pero no por elección más económica que referente a calidad y precio.

La creciente demanda de instalaciones derivadas del alto coste energético de la electricidad ha provocado la incorporación de personal sin la adecuada formación tanto a nivel técnico como de montaje y mantenimiento.

A continuación, se detallan los diferentes errores de diseño en los paneles fotovoltaicos detectados en diversas investigaciones tras siniestros de incendio.

- Errores mecánicos:
 - » Los módulos de capa fina sin marco estaban montados demasiado cerca unos de otros, por lo que, ocurren restricciones, tensiones mecánicas, y como resultado se producen arcos eléctricos.
 - » El montaje de los carriles de soporte junto a las cajas de conexión de los módulos provocó fuerzas de cizallamiento la caja de conexión y como consecuencia un arco eléctrico
 - » La exposición de las cajas de conexión a las condiciones meteorológicas adversas produce un estrés en los contactos debido al aumento de las temperaturas del aire y humedad provenientes de la difusión de vapor en el arco eléctrico por aumento de la resistencia.
 - » Arcos eléctricos por entrada de reptiles en cajas de conexión.

- Errores en el diseño de las instalaciones eléctricas:
 - » Múltiples tendidos eléctricos sin reducción de corriente provocan un sobrecalentamiento de los cables.
 - » Cables infra diseñados produciendo un sobrecalentamiento y por lo tanto incendio.
 - » Inversores de corriente continua infradiseñados produciendo un sobrecalentamiento, creando un arco eléctrico y posterior incendio.
 - » Falta contemplar la disipación simultánea de la potencia máxima de los fusibles.
 - » Fusible de corriente alterna en un circuito de corriente continua, por lo que, el fusible no interrumpe la corriente y puede llegar a producir un arco eléctrico y posterior incendio.
 - » El cableado mal ejecutado en los borneros lo que hace que, el aislamiento se rompa y se produzca un corto circuito en el arco eléctrico y posterior incendio.
 - » Utilización de terminales inadecuados para conectar conductores de aluminio, incrementan la resistencia de contacto causando incendio.
 - » Instalación de los inversores ubicados en sitios inadecuados, exponiéndolos a las condiciones meteorológicas o de modo inadecuado sobre envoltente de material combustible.

- Baja calidad en la mano de obra
 - » El conector de corriente continua no está correctamente instalado.
 - » Tornillos mal fijados donde se pueden generar arcos eléctricos y destrucción de la caja de conexión.
 - » Aislamiento del cable parcialmente insertado en el terminal dando lugar a un sobrecalentamiento.
 - » El fusible no está encajado en el soporte dando lugar a daños en la caja de conexión.
 - » Insuficiente o falta de correcto ensamblaje de los conductores de aluminio por lo que, habrá escaso contacto y el inversor se verá destruido.
 - » Excesiva tensión en los cables, estos tienden a salir de la caja de conexión por lo que, se crea un arco eléctrico.



7 COMPORTAMIENTO DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS FRENTE A UN INCENDIO

Diversos elementos de una planta fotovoltaica son combustibles a causa de su gran contenido de polímero. La proporción de polímeros en módulos con láminas de vidrio cristalino de capa gruesa (c-Si) está entre el 5-10%, lo que corresponde, en términos de masa, alrededor de 600-1200 g/m². Esta proporción se deriva principalmente del material protector (EVA: etilvinilacetato) y de las láminas del lado posterior (PET: polietilentereftalato y PVF: polifluoruro de vinilo).

Los polímeros producen inicialmente un alto valor calorífico, y en las plantas fotovoltaicas, la reacción ante el fuego de los polímeros utilizados en los elementos y su masa tienen una importancia significativa para el desarrollo y la propagación del incendio.

De un informe general de mercados de la revista *Photon* de 2012, se deduce que la tecnología de los módulos cristalinos es claramente la de mayor participación en el mercado, siendo relativamente constante entre un 80% y 90%, mientras que la participación de todas las tecnologías de capa fina oscila entre un 10% y 20% y con tendencia descendente en los últimos años. Para determinar el comportamiento al fuego de los paneles fotovoltaicos se han realizados diversos estudios. Detallamos a continuación una serie de tres de ensayos en laboratorio con las siguientes tecnologías:

- C-Si: Módulo de capa fina cristalina y ensamblaje de láminas de vidrio.
- CIS: Módulo de capa fina en base a semiconductores de selenio, indio y cesio, con ensamblaje de láminas de vidrio.
- CdTe: Módulo de capa fina en base a semiconductores de telurio y cadmio, con ensamblaje de vidrio.

Los experimentos se realizaron bajo un cono calorímetro, apoyándose en las directrices marcadas por la *ISO 9705*, con un caudal de aire de salida de aproximadamente 1 m³/s.

Para el análisis del comportamiento del fuego se midieron las siguientes variables:

- Tasa de liberación de calor.
- Tasa de generación de humo.
- Temperaturas en la parte frontal y trasera del módulo.

- Pérdida de masa de los módulos y masa de los residuos del incendio.
- Superficie del módulo dañada.

Se pudo observar el comportamiento del fuego en los diferentes materiales que se utilizan en la producción de los paneles fotovoltaicos cuyos resultados se exponen a continuación.

- *Módulos de láminas de vidrio (c-Si, CIS):* Como resultado, se verificó que en las muestras de ensayo, el material en llamas se desprendió pasados unos 1,5 a 4 minutos y a su vez se desprendió la lámina trasera. Al cabo de unos 6 a 8 minutos, se incendiaron por completo. La cubierta superior de vidrio se quebró a los 12 minutos, quedando la mayor parte de la misma totalmente descompuesta.
- *Módulo vidrio-vidrio (Cd-Te):* En este ensayo también se produjo el desprendimiento del material pasados 2,5 minutos. El vidrio de la parte trasera se quebró a los 4 minutos, y, 30 segundos más tarde se expandió el incendio.

Como resultado de los ensayos realizados, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Los módulos fotovoltaicos son altamente combustibles, independientemente de su tecnología y tipo de construcción.
- Los materiales en llamas pueden desprender gotas de material fundido, pudiendo afectar a la cubierta del edificio y expandirse por toda la edificación.
- Los módulos vidrio-vidrio desarrollan, debido a su menor contenido en polímero, menos calor de combustión y gases de combustión.



8 REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS ASOCIADOS A INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS EN EDIFICACIONES

Las instalaciones fotovoltaicas pueden integrarse en el edificio *sobre la piel del edificio o como parte de la piel o envolvente* según la norma *EN-50583-1 Edificios con instalación fotovoltaica-Parte 1: Módulos BIPV*, donde se indica que el método de aplicación se distingue del BAPV si el módulo debe sustituirse por un material de construcción adecuado en caso de que este se desmonte.

BIPV son las siglas del inglés “Building-Integrated Photovoltaics”, que en español se traduce como fotovoltaica integrada en edificios. Se refiere a la integración de los módulos fotovoltaicos en los elementos de construcción del edificio, como las ventanas, las fachadas, los techos y otros elementos estructurales. La idea detrás de BIPV es que los módulos fotovoltaicos no solo produzcan electricidad, sino que también cumplan una función estética y arquitectónica al ser parte de la estructura del edificio.

Los sistemas fotovoltaicos aplicados en edificios BAPV, por otro lado, son sistemas fotovoltaicos convencionales que se instalan en la superficie del edificio, como en el techo o en la pared, es decir sobre la envolvente del edificio. A diferencia de BIPV, los sistemas BAPV no se integran en la estructura del edificio y pueden tener un aspecto más tradicional.

Ambos tipos de sistemas fotovoltaicos son importantes para la implementación de la energía solar en los edificios. Los sistemas BIPV tienen una mayor capacidad para integrarse en el diseño arquitectónico del edificio y pueden ser más estéticamente atractivos, pero pueden ser más costosos y técnicamente desafiantes de instalar. Los sistemas BAPV, por otro lado, son más fáciles de instalar y pueden ser una opción más práctica y económica para algunos edificios.

En resumen, mientras que BIPV se refiere a la integración de los módulos fotovoltaicos en los elementos de construcción del edificio, los sistemas BAPV son sistemas fotovoltaicos convencionales instalados en la superficie del edificio, como en el techo o en la pared.

A nivel europeo, los módulos BIPV y BAPV están regulados por diversas normas ya que, los módulos BIPV se consideran como componente de construcción, mientras que los BAPV son una tecnología adicional aplicada

a una construcción existente y, por tanto, se considera como un componente individual.



Fig. 27 Esquema de BAPV y BIPV.

Es importante destacar que para los sistemas BAPV, las guías europeas se limitan al informe técnico *CLC/TR 50670* elaborado por el *Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC)* y los métodos de ensayo descritos en la norma *UL 1703*, tal y como se sugiere en el apéndice B de la norma *IEC/EN 61730-2*. Sin embargo, en Europa, la seguridad contra incendios de los sistemas BAPV depende de los requisitos nacionales.

Por lo tanto, el riesgo de incendio asociado a las tecnologías renovables aún no ha sido reconocido por las autoridades responsables de diversos países europeos.

A nivel internacional se está en proceso de desarrollo de requerimientos en diversos países, a modo de ejemplo, Singapur ha publicado, en abril de 2023, a la normativa que regulará los requerimientos de estas instalaciones.

Analizando diferentes documentos que ayudan a entender cómo se está manejando este problema en otros países, incluyendo análisis técnicos por parte de algunas publicaciones y asociaciones internacionales, se ha obtenido la siguiente información.

John Weaver redactó para PV Magazine en 2019 un artículo generalista de riesgo de incendio con instalaciones fotovoltaicas, de donde se han obtenido los siguientes datos:

- En Estados Unidos los accidentes que ocurren con instalaciones fotovoltaicas no se estudian de manera específica como tal, ya que son clasificados por el National Data Fire Center como “Otros accidentes”; por lo que no hay un número claro disponible de estos sucesos.
- La Japanese Consumer safety Investigation Comission reportó hasta finales de 2017, durante un periodo de 10 años, 127 incendios de instalaciones solares en cubiertas, de los cuales 7 supusieron extensión del incendio a la misma. En Japón, a octubre de 2018, había 2.4 millones de instalaciones solares.

• Italia:

En Italia, el estudio Fires in Photovoltaic Systems: Lessons Learned from Fire Investigations in Italy, Issue 99, de Luca Fiorentini, Luca Marmo, Enrico Danzi and Vincenzo Pucciade, de la SPFE (Society of Fire Protection Engineers), nos da varios apuntes de interés:

Precisamente, en Italia, en los últimos años se ha observado un aumento en el número de incendios donde se ven involucradas instalaciones fotovoltaicas, donde los incentivos estatales han supuesto un enorme incremento en la colocación en las cubiertas de este tipo de instalaciones. El estudio incluye una tabla de los incendios declarados en instalaciones fotovoltaicas desde 2003 hasta 2014, con un pico en 2012 de casi 800 incendios.

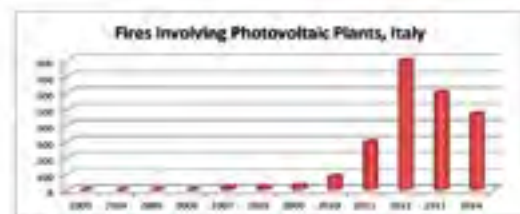


Table F: Fires related to Photovoltaic Installations, courtesy of Italian National Fire Corp. Statistics Service.

La mayor profesionalización de los instaladores y mantenedores, así como mejores estándares de los productos y el aumento del control por parte del gobierno derivó en un descenso de los accidentes a partir del año 2012.

Muchos de los accidentes asociados a este tipo de instalaciones supusieron grandes incendios en cubiertas y a menudo provocaron incendios en el interior de las naves y pérdida de la estructura. La investigación de estos incendios concluyó que la ignición del material aislante de la cubierta, a menudo espuma de poliuretano o poliestireno, fueron factores que contribuyeron al desarrollo de incendio. El estudio indica que fruto del análisis de los incendios se observaron ciertos escenarios principales donde se ven involucradas este tipo de instalaciones. Incendios que se inician en los edificios y que se extienden a través de las aberturas y se propagan por la propia cubierta.

Italia ha publicado requerimientos de seguridad desde el año 2012 y con el objetivo de reducir los daños causados por un incendio en los paneles fotovoltaicos y sus consecuencias en los edificios, los servicios nacionales de bomberos italianos han publicado una directriz. La guía se ha desarrollado con un enfoque no prescriptivo; acorde con la *Regulación del Producto de Construcción-CPR*. La construcción debería establecerse según el requisito básico n.2 de dicha Regulación - *Seguridad en caso de incendio*, donde se indica que una construcción debe ser diseñada y construida de tal forma que en caso de producirse un incendio cumplirá con lo siguiente requisitos:

- La capacidad estructural de la construcción podrá asumirse durante un periodo de tiempo determinado.
- La generación y propagación del fuego y el humo dentro de la edificación sean limitadas.
- La propagación del incendio a las edificaciones colindantes sea limitada.
- Los ocupantes puedan abandonar la edificación o ser rescatados por otros medios.
- Se tiene además en cuenta la seguridad de los equipos de emergencia.

El diseño y la instalación de un sistema fotovoltaico deben llevarse a cabo para cumplir el requisito básico citado anteriormente, abordando las siguientes cuestiones:

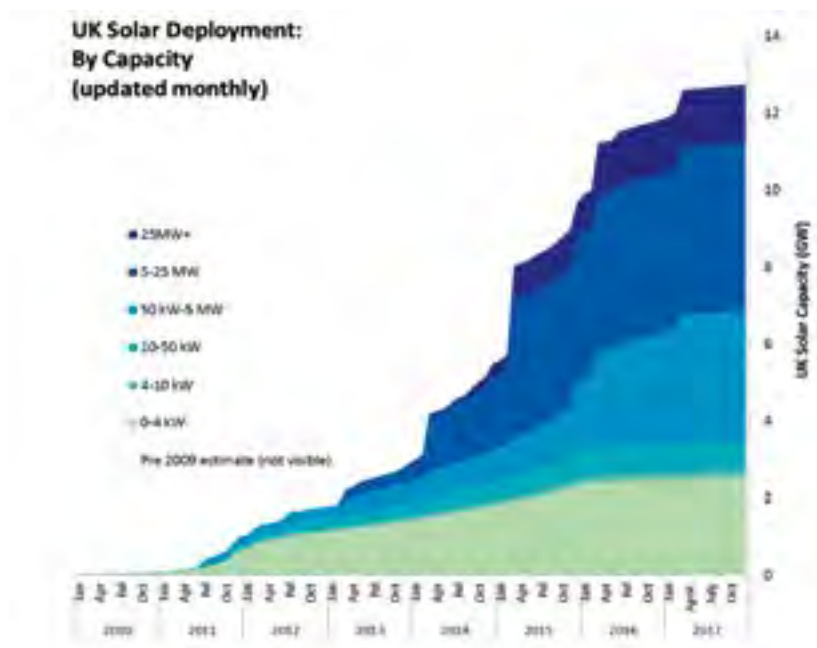
- Evitar la interferencia con el sistema de ventilación de los productos de combustión, la obstrucción de los tragaluces y el impedimento de los extractores naturales de humo y calor.

- Evitar la propagación de un foco de incendio desde el generador fotovoltaico al edificio y/o entre sus compartimentos en los que esté incorporado.
- Evaluar la influencia en la propagación del fuego debido a los cables, cuadros y módulos fotovoltaicos en la cubierta y/o la fachada del edificio.
- Seguridad del personal de mantenimiento.
- Seguridad del equipo de emergencias

• Reino Unido:

El gobierno británico encargó a BRE National Solar Centre la elaboración del estudio “Fire and Solar PV Systems. Investigations and evidences”, que recoge los resultados minuciosos del análisis de 80 incendios en los que se vieron envueltas instalaciones fotovoltaicas en Reino Unido desde 2015 hasta 2018. Los resultados obtenidos son que en el momento de la realización de dicho estudio se contabilizaban casi un millón de instalaciones de paneles fotovoltaicos en el Reino Unido, destacándose la tendencia de los últimos años y una evolución alcista de los incidentes esperados.

La gráfica siguiente está extraída de dicho estudio.



Se extrajeron las siguientes conclusiones:

- 38 de los 80 incendios (un 48 %) son clasificados como serios, por la dificultad en la extinción y porque se extendieron más allá de la propia instalación fotovoltaica.
- En 58 incendios (un 73 %) la causa del incendio es la propia instalación. En el resto o la causa es desconocida o la instalación fotovoltaica es la que se vio afectada.
- De los 58 incendios provocados por la propia instalación, 26 (un 45 %) fueron provocados por un deficiente montaje e instalación, frente a los que fueron ocasionados por fallos intrínsecos de la propia instalación, con sólo 9 de esos 80 casos (un 11 %), que reafirma que este tipo de instalaciones son muy seguras intrínsecamente, pero que es el montaje e instalación deficientes los que ocasiona la mayor parte de siniestros.
- Si bien el alcance de este estudio no es profundizar en las formas de la extensión del incendio fuera de la propia instalación PV, menciona expresamente el aumento de riesgo que supone el montaje “in roof” de estas instalaciones, cuando la propia instalación sustituye parcialmente a la cubierta.

Adicionalmente, en 2016 la Fire Protection Association (FPA) de Reino Unido publicó un documento de recomendaciones, elaborado por RISC Authority, organización formada por empresas aseguradoras de Reino Unido que publica “Best Practices” relacionadas con la continuidad de negocio, concretamente la “RC62: Recommendations for fire safety with photovoltaic panel installations”. Esta guía de recomendaciones está orientada a la reducción del riesgo de incendio asociado a instalaciones fotovoltaicas en edificios, tanto residenciales, comerciales como industriales.

En uno de sus apartados menciona literalmente, la siguiente recomendación:

“Careful consideration should be given when it is proposed to site PV panels on combustible roofs, such as timber roofs and roof decks incorporating a combustible roof overlay. Wherever possible this should be avoided.”

• **Alemania:**

En Alemania, en febrero 2020, el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE publicó un estudio “Recent Facts about Photovoltaics in Germany”

sobre la situación del mercado fotovoltaico en el país, incluyendo un capítulo completo para analizar el riesgo de incendio, de donde se extraen las conclusiones siguientes:

- En caso de que exista material combustible cercano al lugar donde se inicia un incendio (por ejemplo por un arco eléctrico en una cubierta), se puede producir la extensión del mismo dependiendo de la facilidad de ignición de los materiales afectados.
- En la fecha de elaboración del informe, se computan en Alemania alrededor de 1.4 millones de instalaciones fotovoltaicas, habiéndose producido 350 incendios. La mayor parte de ellos son producidos por fallos en el cableado y las conexiones.
- En 75 casos (21 %) se habla de daño severo, y en 10 (3 %), de destrucción total del edificio.

• **Estados Unidos:**

Desde 2012 ha aumentado el uso de baterías de iones de litio (Li-ion) en los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) en un amplio espectro de áreas suburbanas y urbanas, como componentes de aparatos eléctricos, así como en viviendas unifamiliares y edificios comerciales, de baja a gran altura. En 2014, el Departamento de Energía de los Estados Unidos desarrolló un plan estratégico para la seguridad de ESS. El objetivo del plan era desarrollar una hoja de ruta de alto nivel para permitir el almacenamiento seguro de energía mediante la identificación de la situación actual y la situación futura de la seguridad deseada del almacenamiento de energía, centrado en tres corrientes:

- Técnicas de validación de seguridad basadas en la ciencia
- Preparación para incidentes
- Documentación de seguridad.

Las actividades derivadas de este plan incluyeron la revisión de los códigos, normas y reglamentos de ESS relevantes para la respuesta a incidentes. El trabajo en estas áreas continúa bajo la Colaboración de Seguridad de Sistemas de Energía.

En 2015, el FPRF lanzó un proyecto para desarrollar una evaluación de riesgos del uso de baterías de iones de litio, facilitar el desarrollo de requisitos de instalación seguros y tácticas de respuesta de emergencia apropiadas. El

informe encontró que hay una falta de pruebas sobre el rendimiento del fuego de Li-ion ESS, y que las recomendaciones de códigos (por ejemplo, de los códigos IFC, NEC y NFPA) son irregulares y, a veces, contradictorias. La información relativa a los incendios reales en ESS es en gran medida anecdótica, ya que no existe un código estadístico de incendios asociado a tales instalaciones, lo que dificulta la obtención de una visión general de los posibles problemas de seguridad contra incendios en dichas instalaciones.

Del mismo modo, Det Norske Veritas (E.E.U.U.) realizó un estudio de las consideraciones para la seguridad contra incendios de ESS en nombre de la Autoridad de Investigación y Desarrollo de Energía del Estado de Nueva York (NYSERDA). Las principales conclusiones del estudio fueron que la instalación de ESS en edificios aumenta el riesgo, aunque se consideraron manejables dentro de los códigos de construcción existentes con los métodos de extinción de incendios establecidos. Sin embargo, se señaló que la cuestión de las emisiones tóxicas debía abordarse como parte de la evaluación del riesgo.

8.1 REGLAMENTOS, NORMAS Y DIRECTRICES

En los E.E.U.U. existen obligaciones de prevención y mitigación de incendios y explosiones para ESS en varios códigos y regulaciones, incluido el Código Internacional de Incendios (IFC), Sección 1206, Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, NFPA 70, el Código eléctrico nacional (NEC), Nacional Asociación de Protección contra Incendios y NFPA 1, el Código Nacional de Incendios (NFC), Asociación Nacional de Protección contra Incendios. Las ediciones 2018 de NFPA 1 y la IFC contienen cláusulas de seguridad actualizadas basadas en las químicas de flujo, plomo-ácido, litio, Ni-Cd y sodio. La CFI (2018) brinda orientación sobre el análisis de reducción de riesgos, las medidas de protección y los requisitos para los documentos de construcción. También vale la pena señalar que la CFI incluye disposiciones sobre sistemas de energía combustible (Sección 2015). También hay una amplia gama de estándares relacionados con el fuego y la explosión para ESS en los Estados Unidos.

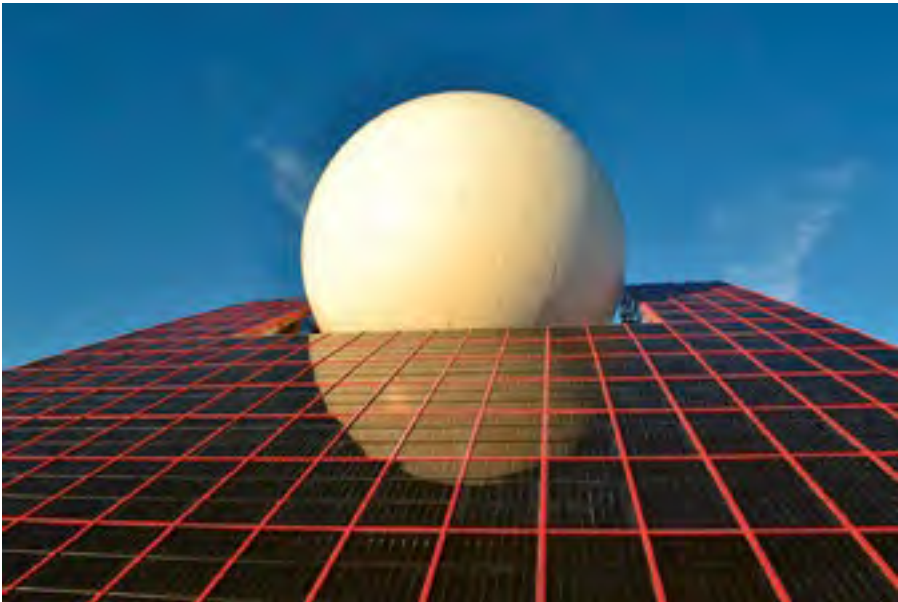
Además de los códigos y normas hay numerosos documentos de orientación disponibles que tratan problemas de seguridad contra incendios en los sistemas de almacenamiento de energía. Por “orientar”, el enfoque no es obligatorio desde el punto de vista de la regulación. Dichos documentos pueden publicarse como pautas para el cumplimiento normativo, información sobre previsión de pérdidas, prácticas recomendadas de instalación, mantenimiento,

como parte de informes de investigación, como artículos publicados... (se mencionan en la bibliografía algunos de estos ejemplares).

Todos los estudios concluyen que los incendios que se inician en módulos fotovoltaicos instalados en cubierta que se extienden al propio edificio

En España, ni el *Código Técnico de la Edificación*, ni el *Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales* contempla ningún requisito de seguridad contra incendios para dichas instalaciones.

“Los sistemas fotovoltaicos y las nuevas fuentes de energía no se consideran un riesgo especial de incendio en la normativa de edificación en España y, por tanto, no se incluyen en las directrices de la normativa de construcción, por consiguiente es imprescindible realizar estudios de ingeniería de protección contra incendios en la instalación de dichos equipamientos para hacer más seguros nuestros edificios y disponer de riesgos asegurable.”



9 CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA EN LA PROPAGACIÓN DE UN INCENDIO

9.1 PROPAGACIÓN DE LLAMA

Se han realizado numerosos estudios acerca de cómo se comporta el incendio para entender la importancia de los parámetros que afectan a la propagación de la llama entre el sistema BAPV y la cubierta subyacente. En general, la propagación de la llama a lo largo de un material sólido debe considerarse como una serie continua de igniciones, además, el proceso de propagación de la llama sobre un combustible sólido puede separarse en cuatro pasos:

- Vaporización de los gases de pirólisis combustibles de la parte sólida.
- Mezcla del oxígeno del aire y los gases de pirólisis cerca de la superficie del combustible.
- Ignición de la mezcla de oxígeno y gases de pirólisis, por lo que se forma una llama de difusión.
- Calentamiento desde el frente de la llama hacia la superficie del combustible no encendido hasta que se alcanza la temperatura de ignición.

9.2 FACTORES MATERIALES

Los factores materiales pueden subdividirse en factores químicos y físicos, donde los factores químicos como la temperatura de ignición, la tasa de liberación de calor y la capacidad calorífica específica dependen de la composición química y de la presencia de retardantes de llama.

9.3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

La inclinación de la superficie puede afectar significativamente la propagación de la llama. En general, las superficies inclinadas hacia arriba (como las pendientes del techo) son más propensas a propagar la llama que las superficies horizontales. Esto se debe a que en las superficies inclinadas, la llama se mueve hacia arriba y se alimenta de combustibles adicionales a medida que se propaga.

La velocidad de propagación de la llama también puede variar según la inclinación de la superficie. En general, las superficies inclinadas tienen una velocidad de propagación de llama más rápida que las superficies horizontales. Esto se debe a que en las superficies inclinadas, la llama se mueve hacia arriba con mayor facilidad, y también puede extenderse más rápidamente a lo largo de la superficie.

Además, la inclinación de la superficie también puede influir en la dirección de propagación de la llama. Por ejemplo, si la superficie está inclinada hacia el viento, la llama puede propagarse más rápidamente en la dirección del viento. Por otro lado, si la superficie está inclinada contra el viento, la propagación de la llama puede ser más lenta o incluso detenerse.

En resumen, la inclinación de la superficie puede tener un impacto significativo en la propagación de la llama en un incendio.

Si se enciende en el centro un combustible homogéneo inclinado, la propagación de la llama hacia arriba será más rápida que la propagación de la llama hacia abajo, debido a la reducción de flujo hacia abajo, dando resultado a una retroalimentación térmica negativa.



Fig. 28 Diferente angulación para determinar la velocidad de propagación.

9.4 PROPAGACIÓN DEL INCENDIO POR DEBAJO DEL MÓDULO BAPV

Una vez comprendidos los parámetros que afectan a la propagación de la llama a lo largo de un combustible sólido, la influencia del módulo fotovoltaico aplicado al edificio por encima de la cubierta, que genera un semi cerramiento o cavidad horizontal.

9.4.1 PROPAGACIÓN DEL INCENDIO ENTRE DOS SUPERFICIES VERTICALES

El escenario de propagación de la llama entre un sistema BAPV y una construcción de cubierta plana es, hasta cierto punto, similar al escenario de propagación de la llama en sistemas de fachada ventilada.

En un semi cerramiento horizontal bajo un sistema BAPV, el proceso de combustión altera la composición de la atmósfera y reduce la concentración de oxígeno y, por tanto, la eficiencia de la combustión. El combustible es impulsado por el flujo flotante y provoca una extensión de la llama cuando el combustible se mezcla con el aire. La longitud de la extensión depende de la velocidad del aire arrastrado, la anchura de la apertura de la cavidad es determinante ya que, la temperatura generada dentro de la cavidad induce a una diferencia de presión. Además de suministrar oxígeno al proceso de combustión, la velocidad del flujo y la baja temperatura relativa del aire arrastrado absorbe energía de los materiales calentados, lo que reduce el flujo de calor hacia los componentes del sistema.

9.4.2 PROPAGACIÓN DEL INCENDIO ENTRE DOS SUPERFICIES HORIZONTALES

La orientación es diferente entre un sistema de fachada ventilada y un sistema BAPV en una construcción de cubierta plana, pero, el nivel de complejidad puede asimilarse. Se ha estudiado cómo afecta la introducción de una barrera horizontal en el flujo de calor hacia la superficie subyacente en experimentos de estado estacionario donde se desconoce la influencia de la barrera horizontal en un escenario transitorio de propagación de la llama, así como la influencia de los parámetros asociados a dicho sistema.

La cantidad de energía absorbida por la barrera depende de la fracción de energía absorbida, reflejada y transmitida. Si el material es opaco, toda la energía que no es reflejada se absorberá por los materiales que dependan

fuertemente en la longitud de la onda. Se ha podido verificar que la complejidad del sistema aumenta cuantos más componentes se tengan en cuenta.

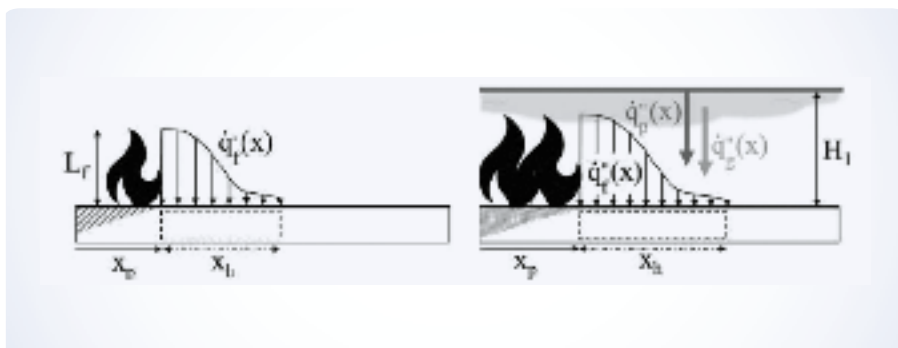


Fig. 29 Transferencia de calor en un modelo que tiene combustible fino y el efecto de la barrera horizontal.

9.4.3 PROPAGACIÓN DEL INCENDIO MEDIANTE LA INFLUENCIA DE UN MÓDULO BAPV

Desde el punto de vista normativo, en Europa, un sistema BAPV no se considera parte del edificio, si no un complemento tecnológico. Sin embargo, en Estados Unidos, la interacción entre el sistema BAPV y las características constructivas de la cubierta son aceptadas, habiéndose desarrollado ensayos basados en métodos ya existentes.

La ilustración a continuación indica que la introducción del módulo BAPV da lugar a una magnitud del flujo térmico redefinido que por defecto permite la propagación autosostenida de la llama. Sin embargo, el flujo de calor añadido debe superar una magnitud determinada para permitir la propagación auto asistida de la llama y, se espera que la magnitud dependa de parámetros asociados a la compleja relación entre la geometría del semi cerramiento y las propiedades de los materiales de la construcción del tejado y el módulo fotovoltaico.



Fig. 30 Proceso de ignición en la cubierta.



10 PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para abordar la prevención de incendios en sistemas fotovoltaicos es esencial realizar un correcto análisis de riesgos basado en ingeniería de seguridad contra incendios por personal altamente cualificado e independiente que pueda garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de los sistemas mediante la aplicación de medidas preventivas que permitan detectar a tiempo cualquier anomalía en el funcionamiento y evitar la propagación al resto de la edificación.

Las instalaciones fotovoltaicas presentan un riesgo de incendio debido a diferentes factores, tales como:

- Cortocircuitos o arcos eléctricos: La corriente eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos y transmitida por los cables puede provocar cortocircuitos o arcos eléctricos, que pueden generar chispas y calor suficiente para iniciar un incendio.
- Sobrecalentamiento de los componentes: Los paneles, inversores y otros componentes pueden sobrecalentarse si no están instalados o ventilados adecuadamente, lo que aumenta el riesgo de incendio.
- Fallos en los sistemas de protección: Los sistemas de protección contra sobrecargas, cortocircuitos y otros riesgos eléctricos pueden fallar, lo que aumenta el riesgo de incendio.
- Factores ambientales: Las condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas, vientos fuertes, lluvias de granizo pueden aumentar el riesgo de incendio en las instalaciones fotovoltaicas.
- Fallos en las baterías: En los sistemas que utilizan baterías para almacenar energía, los fallos en las baterías pueden provocar sobrecalentamiento y riesgo de incendio.
- Deficiente mantenimiento.
- Puntos calientes en paneles derivados de sombras, hojas, suciedad, excrementos de pájaros.
- Desalineaciones y grietas en paneles
- Actividad de roedores y reptiles.

Es importante tomar medidas de seguridad y prevención en la instalación y mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas para reducir el riesgo de incendio y garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

- A continuación, se presentan algunas medidas de prevención que pueden ayudar a evitar incendios en sistemas fotovoltaicos:
- Selección de componentes de calidad: Es importante elegir componentes de calidad y certificados para el sistema fotovoltaico, como paneles solares, inversores, baterías y cables. Los componentes de baja calidad o sin certificación pueden ser más propensos a fallas y sobrecalentamiento, lo que puede aumentar el riesgo de incendios.
- Diseño adecuado de la instalación: El diseño adecuado de la instalación fotovoltaica puede minimizar el riesgo de incendios. Es importante asegurarse de que los paneles solares estén instalados correctamente y que los cables estén bien conectados y protegidos.
- Mantenimiento regular: Es fundamental realizar mantenimiento regular en el sistema fotovoltaico para garantizar su buen funcionamiento y prevenir posibles fallas. Esto incluye la limpieza de los paneles solares, la inspección de los cables y la comprobación de la tensión y corriente de la instalación.
- Protección contra sobrecarga: La instalación de dispositivos de protección contra sobrecarga, como fusibles y disyuntores, puede evitar que los cables y componentes del sistema se sobrecalienten y causen un incendio.
- Protección contra descargas eléctricas: Es importante instalar un sistema de protección contra descargas eléctricas en la instalación fotovoltaica para minimizar el riesgo de daños por rayos.
- Análisis del comportamiento al fuego de los diferentes materiales secundarios como el empleo diversos pegamentos y materiales de sellado, así como de aislamiento en las cajas y cables de conexión y en los conectores.
- Monitoreo del sistema: El monitoreo constante del sistema fotovoltaico puede ayudar a detectar cualquier problema antes de que se convierta en un riesgo de incendio.

En resumen, la prevención de incendios en sistemas fotovoltaicos se basa en la selección de componentes de calidad, el diseño adecuado de la instalación, el mantenimiento regular, la protección contra sobrecarga y descargas eléctricas, y el monitoreo constante del sistema. Estas medidas pueden ayudar a minimizar el riesgo de incendios y garantizar la seguridad y el buen funcionamiento del sistema fotovoltaico

11 OPERACIONES EN LA INTERVENCIÓN DE LOS BOMBEROS

En Estados Unidos, según un artículo publicado por *CAL FIRE* “Operaciones contra incendios para incendios en paneles fotovoltaicos” (noviembre, 2010) se establecen recomendaciones operativas según el riesgo y la localización del incendio.

- Operaciones en tejado: Se deberá realizar una inspección visual de los componentes del sistema fotovoltaico para determinar si están afectados por el incendio. Se deberá proteger de productos químicos potencialmente peligrosos provenientes de los módulos fotovoltaicos incendiados, mediante equipos de respiración autónoma.
- Operaciones en el interior: El agua será dirigida hacia el sistema fotovoltaico en un patrón de niebla de 30 grados para evitar que cualquier corriente eléctrica desplace el agua hacia los bomberos. Además, deberán mantener una distancia de seguridad de al menos 10 m. con la fuente energizada. En todas las intervenciones deberán llevar el equipo de respiración autónoma debido a los gases tóxicos que se generan. Se debe tener presente que puede producirse una explosión por las baterías de almacenamiento de energía proveniente del sistema fotovoltaico.
- Operación de búsqueda y rescate: Se deberá transmitir toda la información disponible de los componentes del sistema fotovoltaico al Mando de la intervención y desconectar los interruptores de desconexión.
- Operación de Revisión: Se deberá revisar y confirmar que el sistema fotovoltaico ha sido desenergizado, cabe recordar que los paneles fotovoltaicos mientras reciben luz solar estarán produciendo energía.

En España, el equipo de Bombers de Barcelona realizó un documento en 2012, que posteriormente ha sido actualizado en 2016, en el cual se indica expresamente cómo se debe actuar en caso de incendio en una instalación fotovoltaica.

Los riesgos potenciales a los que se enfrentan los bomberos en este tipo de incendio son los siguientes:

- Gases tóxicos: Gases tóxicos inflamables que pueden ser liberados por el incendio en los paneles fotovoltaicos.

- Colapso o caída de objetos: Los sistemas fotovoltaicos instalados sobre los tejados pueden caer hacia dentro de la edificación tras el colapso de la cubierta a causa del incendio. Se debe delimitar una zona de riesgo debido a la caída de objetos.
- Riesgo Eléctrico: Los paneles fotovoltaicos generan altos voltajes de corriente continua y el sistema convierte la tensión continua en el inversor a corriente alterna. Se deberá mantener en todo momento la distancia de seguridad.
- Propagación del incendio: Prestar atención a la formación de arcos eléctricos. Puede producirse el efecto chimenea por la fachada, lo que aumenta el riesgo de propagación de llamas. Se deberán utilizar cámaras de IR (infrarrojos) para visualizar el aumento de la temperatura de la zona afectada.
- La actuación de extinción en la cubierta o tejado debe tener presente la resistencia estructural, que en cubiertas ligeras de naves industriales puede ser inferior a los 15 minutos.



Fig. 31 Intervención de bomberos en edificio residencial.

Es importante considerar que el *International Fire Code* en su capítulo 12 *Energy Systems* en la sección 1204 indica las directrices a incluir en los diseños e instalaciones de los sistemas fotovoltaicos de cara a la identificación de los elementos y que posibiliten su desconexión.



Fig. 32 Guía técnica elaborada por Bombers de Barcelona.

Algunos de los principales directrices en las instalaciones de sistemas de generación fotovoltaica son las siguientes:

- Identificación de todos los elementos del sistema. Dicha identificación debe ser tanto en la parte interna como en la exterior de la instalación.
- El material de las etiquetas debe ser reflectante y resistente a la intemperie, sus letras deben insertarse en mayúsculas y con contraste de fondo.

11.1 CONDICIONES EN LA INSTALACIÓN PARA LA SEGURIDAD Y MITIGACIÓN DE LOS INCENDIOS EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Las condiciones de intervención de bomberos en instalaciones fotovoltaicas pueden variar dependiendo del tipo de instalación y del tamaño de la misma. Sin embargo, en general, es importante que los bomberos estén

capacitados para reconocer los riesgos específicos asociados a las instalaciones fotovoltaicas y que se comuniquen con los técnicos responsables de la instalación para obtener información sobre la ubicación de los paneles solares, el tipo de sistema de conexión y desconexión, la capacidad de la batería, la presencia de elementos inflamables y otros riesgos potenciales.

En términos generales, los bomberos deben seguir las siguientes pautas al intervenir en una instalación fotovoltaica:

- Mantenerse alejados de las instalaciones fotovoltaicas hasta que estén seguros de que no hay peligro de descarga eléctrica.
- Cortar la electricidad de la instalación fotovoltaica antes de realizar cualquier operación de extinción.
- Identificar la ubicación de los elementos inflamables y retirarlos del área de la instalación fotovoltaica.
- Usar equipos de protección personal (EPP) adecuados, incluyendo guantes dieléctricos y gafas de seguridad.

Se recomienda que los bomberos reciban capacitación específica en instalaciones fotovoltaicas y que se comuniquen con los técnicos de la instalación para obtener información específica antes de intervenir en cualquier incendio en una instalación fotovoltaica.

Las distancias en los pasillos de intervención de bomberos en cubiertas de naves industriales con instalaciones fotovoltaicas deben ser adecuadas para garantizar la seguridad de los bomberos durante su intervención y garantizar un acceso a la cubierta mediante escaleras.

En general, se recomienda que los pasillos tengan una anchura mínima de 2,50 metros para permitir la movilidad de los bomberos y el transporte de equipos y herramientas. Además, se debe asegurar que los pasillos estén libres de obstáculos y que sean lo suficientemente resistentes para soportar el peso de los bomberos y su equipo.

Un pasillo libre alrededor del perímetro de la cubierta y conjunto de paneles de más de 2.5 metros para disponer de un acceso seguro a la hora de llevar a cabo un rápido acceso para la intervención en caso de un pequeño conato de incendio.

En cuanto a las distancias entre las filas de paneles fotovoltaicos, se recomienda una separación mínima de 1,50 metros para permitir el acceso de los

bomberos. También es importante tener en cuenta la distancia a las instalaciones eléctricas y de almacenamiento de energía.

Es importante que los bomberos estén entrenados y familiarizados con los procedimientos de intervención en instalaciones fotovoltaicas para garantizar una intervención segura y eficaz en caso de emergencia.

En instalaciones fotovoltaicas situados en edificios residenciales se aplican las siguientes directrices:

- Espacio libre de 1 metro en los perímetros de la cubierta.
- Espacio libre de 1 metro desde la cumbrera.
- Espacio libre 0,5 metros a cada lado de los refuerzos estructurales.

En centros comerciales y otras edificaciones se deben incluir accesos:

- Zona perimetral en la cubierta de al menos 1 metro de ancho.
- Un pasillo de al menos 1.5 metros de ancho de acceso central a la cubierta del edificio en ambas direcciones.
- Espacios libres de 1.5 metros de ancho alrededor de cualquier elemento ajeno al sistema fotovoltaico.



12 ÁREA DE INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS

Es de vital importancia investigar los incidentes que se hayan producido en las instalaciones fotovoltaicas para poder transmitir lo aprendido y solucionar el problema en un futuro.

La investigación de incendios en instalaciones fotovoltaicas puede ser compleja y requiere de una metodología específica para determinar la causa raíz del incendio y prevenir futuros incidentes. A continuación, se presentan algunos aspectos importantes a considerar en la investigación de incendios en instalaciones fotovoltaicas:

- **Preservación del lugar del incendio:** Es importante preservar el lugar del incendio y recopilar la mayor cantidad posible de evidencia, como fotografías, videos, documentos y testimonios de testigos. Esto puede ayudar a establecer la secuencia de eventos y la causa raíz del incendio.
- **Identificación de la fuente del incendio:** Es importante determinar dónde comenzó el fuego y qué lo causó. La fuente del fuego puede ser un cortocircuito, un arco eléctrico, una chispa, un fallo en el inversor o un problema en el cableado.
- **Análisis de la instalación:** Es importante revisar la instalación y verificar si se han cumplido los códigos y estándares de seguridad, si se han utilizado materiales adecuados y si se han llevado a cabo inspecciones y mantenimientos regulares.
- **Evaluación del diseño:** Se debe evaluar el diseño de la instalación para verificar si se han considerado factores como la ubicación, la inclinación, la ventilación y el espacio necesario para el mantenimiento.
- **Análisis del equipo:** Es importante analizar el equipo utilizado en la instalación, como los paneles, los inversores, los sistemas de baterías y los dispositivos de protección, para identificar posibles fallos o deficiencias.
- **Consulta a expertos:** En algunos casos, puede ser necesario consultar a expertos en electricidad, ingeniería, química y otros campos para determinar la causa raíz del incendio.

Una investigación adecuada de incendios en instalaciones fotovoltaicas puede ayudar a prevenir futuros incidentes y mejorar la seguridad en la generación de energía solar.

Los datos históricos de los incidentes en nuestro país no se recopilan.

Es necesario desarrollar un sistema de datos que nos permita tener conciencia de la magnitud del problema.

Con el objeto de poder recopilar datos se debe de establecer una red principalmente de contactos de la industria fotovoltaica que realizó la instalación y los servicios de bomberos y las asociaciones de ingeniería de protección contra incendios y las compañías aseguradoras deberían liderar recopilación y posterior análisis para posteriormente transmitirlo a las sociedad y a las autoridades competentes.

Con dicho fin se ha elaborado un formulario de captura de datos para reflejar los campos de la base de datos, con el fin de registrar los datos de la forma más coherente y completa posible.

12.1 SOBRE EL TERRENO

La investigación forense “in situ”, activa y de una rápida intervención realizada por un equipo de técnicos cualificados para analizar el incidente es fundamental para determinar la causa del incendio.

A continuación, se detallan los criterios para la evaluación del escenario.

Hay tres escenarios potenciales de investigación:

- Cualquier incidente en el que un sistema fotovoltaico esté claramente implicado como posible causa del incendio.
- Donde esté presente un sistema fotovoltaico pero no sea el causante del incendio.
- Cuando un sistema fotovoltaico esté presente pero no quede claro que sea el causante del incendio.

Para realizar el trabajo de investigación en el lugar del incidente se deberán tomar precauciones ya que, se está trabajando con equipos eléctricos inestables y, además, será imprescindible protegerse de posibles desprendimientos o caída de objetos debido al daño producido en el edificio a causa del incendio.

A continuación se presenta un posible formulario para la captación de datos de incendios en instalaciones fotovoltaicas:

1. Información general

- Fecha y hora del incidente

- Nombre de la instalación
- Ubicación de la instalación (dirección y coordenadas geográficas)
- Tamaño de la instalación (potencia nominal y área ocupada)
- Tipo de instalación (sobre tejado, en el suelo, integrada en edificio, etc.)

2. Descripción del incidente

- Tipo de fuego (incendio en el panel, en el inversor, en la batería, etc.)
- Ubicación del fuego (panel, inversor, batería, cableado, etc.)
- Causa probable del incendio (sobrecalentamiento, cortocircuito, arco eléctrico, descarga atmosférica, etc.)
- Efectos del fuego (daños a la instalación, pérdida de producción, heridos, etc.)
- Acciones tomadas para extinguir el fuego (por ejemplo, uso de extintores, llamada a bomberos, etc.)

3. Antecedentes

- Fecha de la última revisión o mantenimiento de la instalación
- Cambios realizados en la instalación en los últimos meses
- Antecedentes de incidentes previos en la instalación
- Condiciones meteorológicas en el momento del incendio

4. Información del equipo

- Fabricante y modelo del panel
- Fabricante y modelo del inversor
- Fabricante y modelo de las baterías (si las hay)
- Edad de los equipos
- Estado de conservación de los equipos (apariencia, oxidación, desgaste, etc.)

5. Información sobre la instalación eléctrica

- Diseño de la instalación eléctrica (conexión en serie o paralelo, tipo de cableado, protecciones, etc.)

- Esquema de protecciones de la instalación (interruptores, fusibles, protecciones contra sobretensión, etc.)
- Descripción del sistema de puesta a tierra
- Nivel de irradiación solar en el momento del incendio

Este formulario puede ser modificado y adaptado según las necesidades específicas de cada investigación. Es importante recolectar toda la información relevante para poder determinar la causa del incendio y prevenir futuros incidentes en instalaciones fotovoltaicas.

12.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

En los casos en los que un componente sea identificado como causa probable del incendio, los restos deben ser recogidos del escenario y transportados a un laboratorio donde sean analizados con detalle. Uno de los componentes más comunes es el aislante del interruptor de corriente continua ya que requiere del desmontaje en un entorno seguro y la inspección minuciosa de las piezas pequeñas para llegar a conclusiones fiables.

En caso de incendios muy destructivos ante la falta de evidencias es recomendable recopilar y enviar ciertos materiales al laboratorio para su análisis. Estos materiales pueden ayudar a determinar la causa del incendio y contribuir a la investigación y prevención de futuros incidentes. A continuación, se mencionan algunos de los materiales que podrían ser útiles para enviar al laboratorio:

- Muestras de cables: Recopilar muestras de los cables afectados por el incendio, tanto los cables de CC como los de CA, puede permitir el análisis para detectar signos de sobrecalentamiento, desgaste u otros posibles problemas.
- Muestras de paneles solares: Si es posible, tomar muestras de los paneles solares afectados por el incendio. El análisis de estas muestras puede revelar daños específicos en los paneles, como puntos calientes, grietas, roturas o fallos en las conexiones.
- Componentes del inversor: Enviar componentes del inversor que hayan sido dañados o afectados por el incendio puede proporcionar información sobre posibles fallos en el sistema eléctrico y ayudar a identificar la causa raíz del incendio.

- **Materiales aislantes:** Si hay materiales aislantes, como cables con aislamiento de PVC o aisladores, que hayan estado involucrados en el incendio, recolectar muestras de estos materiales puede permitir el análisis para detectar signos de combustión, derretimiento o degradación.
- **Otros componentes dañados:** Además de los elementos mencionados anteriormente, puede ser útil enviar al laboratorio otros componentes o partes del sistema fotovoltaico que hayan resultado dañados por el incendio. Esto puede incluir conectores, fusibles, cajas de empalmes u otros elementos relacionados.

Es importante tener en cuenta que la recopilación de muestras debe realizarse siguiendo los procedimientos de seguridad adecuados y teniendo en cuenta cualquier riesgo residual de incendio o exposición a sustancias peligrosas. Además, se recomienda consultar a expertos en análisis forense o laboratorios especializados en incendios para obtener orientación específica sobre los materiales y el procedimiento de envío más adecuado en cada caso.



13 PROYECTO DE LA INSTALACIÓN

Un proyecto de instalación fotovoltaica debe contener varios elementos clave para garantizar su correcta planificación, diseño e implementación.

A continuación, se enumeran algunos de los elementos que deben incluirse en un proyecto de instalación fotovoltaica:

- **Información del cliente:** Incluye detalles sobre el cliente, como nombre, dirección y contacto de la persona responsable del proyecto.
- **Objetivos del proyecto:** Describe los objetivos específicos que se desean lograr con la instalación fotovoltaica, como la generación de energía renovable, reducción de costos energéticos o cumplimiento de requisitos ambientales.
- **Análisis del sitio:** Incluye información detallada sobre el sitio donde se realizará la instalación fotovoltaica, como coordenadas geográficas, características topográficas, orientación e inclinación del terreno, sombreado y cualquier restricción o limitación del sitio.
- **Estudio de cargas:** El estudio de cargas en instalaciones fotovoltaicas incluye la consideración de dos tipos principales de cargas: peso muerto y sobrecargas.

El peso muerto se refiere al peso propio de los componentes de la instalación, como los paneles solares, estructuras de montaje, cables y equipos auxiliares. Estas cargas se calculan en función de las especificaciones técnicas de los materiales utilizados y se distribuyen de manera adecuada en la estructura de soporte. También se consideran las cargas adicionales debidas a elementos como acumuladores, inversores y sistemas de almacenamiento.

Las sobrecargas se refieren a las cargas externas que pueden afectar a la instalación fotovoltaica, como vientos, nieve, hielo y otros eventos climáticos extremos. Estas cargas se evalúan según las condiciones locales y las normas de diseño aplicables. Por ejemplo, se considera la velocidad del viento máxima esperada en la zona, la carga de nieve máxima y otros factores relevantes.

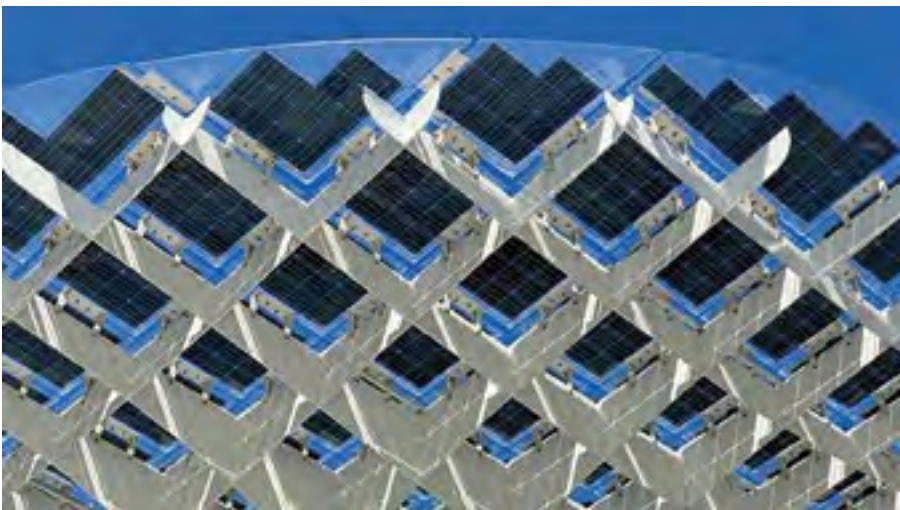
Asegurar que los paneles fotovoltaicos son resistentes al granizo según la zona, considerando el riesgo existente en la zona, así como a los efectos derivados de la exposición a ambientes marinos.



Se debe garantizar en el diseño que los sistemas de drenaje desde cubierta se mantienen limpios y libres de obstrucciones de paneles cables etc., en instalaciones fotovoltaicas es fundamental para garantizar la seguridad estructural de los componentes y prevenir posibles fallos o daños. Los cálculos y consideraciones adecuadas en relación con el peso muerto y las sobrecargas aseguran que la instalación pueda soportar las condiciones ambientales y funcionar de manera confiable a lo largo de su vida útil.

- Cálculos de generación de energía: Estima la cantidad de energía que se espera generar a partir del sistema fotovoltaico, considerando la radiación solar disponible en la ubicación y las características técnicas de los paneles solares.
- Diseño del sistema: Describe la configuración y diseño del sistema fotovoltaico, incluyendo el número y tipo de paneles solares, la disposición en serie o en paralelo, la capacidad de los inversores, el tipo de estructuras de montaje y otros componentes necesarios. Descripción de instalación con características técnicas, hojas de datos de equipos de los elementos que lo componen (tipos de paneles fotovoltaicos, tipos de cableados a utilizar, inversores, tipo de sistemas de puesta a tierra, etc.). Certificaciones de los módulos fotovoltaicos.
- Esquemas y diagramas: Incluye esquemas y diagramas que ilustran la distribución de componentes, la conexión eléctrica y la disposición general del sistema fotovoltaico. Detalle soportes y estructuras de sustentación. Bases de diseño de los soportes y la estructura.

- » Inclínación paneles en relación con la cubierta. Separación paneles fotovoltaicos en relación de cubierta. Inclínación de cubiertas. Características de pasillos perimetrales y de acceso a equipos/elementos existentes en la cubierta. Áreas alrededor de dichos elementos. Planos a escala del edificio, cubierta, layout de los paneles y del cableado. Esquemas unifilares eléctricos de la nueva instalación y su integración en el esquema unifilar de la fábrica.
- Análisis económico: Evalúa los aspectos económicos del proyecto, como los costos de inversión, los ahorros esperados en los costos de energía, el período de retorno de la inversión y otros indicadores financieros relevantes.
- Plan de instalación: Describe los pasos y procesos necesarios para la instalación física del sistema fotovoltaico, incluyendo la secuencia de trabajo, los plazos estimados, los requisitos de seguridad y cualquier permiso o trámite requerido.
- Mantenimiento y operación: Proporciona recomendaciones y pautas para el mantenimiento y operación adecuados del sistema fotovoltaico a lo largo de su vida útil, incluyendo la limpieza de los paneles solares, la inspección regular y el monitoreo del rendimiento.
- Consideraciones regulatorias y normativas: Incluye el cumplimiento de los requisitos legales y normativos aplicables, como los requerimientos de compañías de seguros.



14 PROYECTO DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Se debe realizar un análisis por parte de una ingeniería independiente de seguridad contra incendios que evalúa y diseña las medidas de protección contra incendios por parte de un ingeniero especializado en esta disciplina, que actúa de forma independiente y objetiva.

La ingeniería independiente de seguridad contra incendios involucra varios aspectos, entre ellos:

- **Evaluación de riesgos:** El ingeniero lleva a cabo un análisis exhaustivo de los posibles riesgos de incendio en la instalación, considerando factores como la naturaleza de la actividad, la presencia de materiales inflamables, los procesos y equipos utilizados, así como las condiciones ambientales y los requisitos normativos aplicables.
- **Diseño de medidas de protección:** En base a la evaluación de riesgos, el ingeniero propone y diseña medidas de protección contra incendios adecuadas para minimizar los riesgos identificados. Esto puede incluir sistemas de detección y alarma de incendios, sistemas de extinción automáticos o manuales, sistemas de evacuación, y otras medidas de protección pasiva, como la compartimentación y el uso de materiales resistentes al fuego.
- **Análisis de cumplimiento normativo:** El ingeniero asegura que las medidas de seguridad contra incendios propuestas cumplan con los requisitos y normativas locales, nacionales e internacionales aplicables. Esto implica tener un conocimiento profundo de los códigos de seguridad contra incendios a nivel internacional y esta al día del estado del arte en dicha materia, así como posibles regulaciones de seguridad y estándares relacionados con la prevención y protección contra incendios así como requerimientos de compañías de seguros.
- **Supervisión de la implantación:** Durante la fase de construcción o modificación de una instalación, el ingeniero independiente puede supervisar la implementación de las medidas de protección contra incendios para garantizar que se realicen de acuerdo con los diseños y especificaciones establecidas. Esto incluye la verificación de la instalación correcta de los sistemas y equipos, así como la realización de pruebas y certificaciones.
- **Auditorías y revisiones periódicas:** El ingeniero puede realizar auditorías y revisiones periódicas de las instalaciones existentes para verificar

el cumplimiento continuo de las medidas de seguridad contra incendios. Esto implica evaluar el funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de protección, así como identificar posibles mejoras o actualizaciones necesarias.

La ingeniería independiente de seguridad contra incendios es importante para garantizar un enfoque imparcial y objetivo en la implementación de medidas de protección contra incendios, asegurando la seguridad de las personas y la protección de los activos en una instalación determinada.

Estos son algunos de los elementos que deben considerarse en un proyecto de instalación fotovoltaica. La complejidad y el alcance del proyecto pueden variar dependiendo de la escala y los requisitos específicos de cada instalación.

Un proyecto de seguridad contra incendios para una instalación fotovoltaica debe tener en cuenta diversas medidas y consideraciones específicas para prevenir y mitigar el riesgo de incendios.

A continuación, se presentan algunos elementos que deben incluirse en dicho proyecto:

- **Análisis de riesgos:** Identifica los posibles riesgos de incendio asociados con la instalación fotovoltaica, como cortocircuitos, sobrecalentamiento de cables, inflamabilidad de materiales o equipos eléctricos, y evalúa su probabilidad y potencial impacto.
- **Sistema de detección de incendios:** Define el tipo de sistema de detección de incendios a utilizar, como detectores de humo en salas técnicas y de inversores o cámaras térmicas en la zona de implantación de paneles fotovoltaicos. También se especifica la ubicación estratégica de los detectores y la forma en que se interconectan con otros sistemas de seguridad.
- **Extinción de incendios:** Determina el tipo de sistema de extinción de incendios adecuado para la instalación fotovoltaica. Esto puede incluir sistemas automáticos, sistemas de supresión de agentes químicos, o sistemas manuales, como extintores portátiles. Se establece la distribución, capacidad y mantenimiento de los equipos de extinción.
- **Plan de evacuación:** Elabora un plan detallado de evacuación en caso de incendio, que incluya rutas de escape, puntos de encuentro seguros, señalización adecuada y capacitación del personal sobre los procedimientos

de evacuación. También se deben tener en cuenta las vías de acceso para los servicios de emergencia.

- **Protección pasiva contra incendios:** Se evalúa y especifica la aplicación de medidas de protección pasiva, sectorización de elementos clave como salas de inversores y barreras cortafuegos en la instalación del cableado, revestimientos resistentes al fuego, compartimentación de áreas y sistemas de ventilación adecuados.
- **Formación y concienciación:** Se establece un programa de formación y concienciación sobre la prevención y respuesta ante incendios dirigido al personal que trabaja en la instalación fotovoltaica. Esto incluye la identificación y notificación temprana de situaciones de riesgo, así como el uso correcto de los equipos de seguridad y las medidas de respuesta en caso de incendio.
- **Mantenimiento y revisión periódica:** Se establece un plan de mantenimiento regular de los sistemas de seguridad contra incendios, incluyendo la inspección y prueba de los equipos, así como el reemplazo o actualización según sea necesario. También se establecen revisiones periódicas del proyecto de seguridad contra incendios para asegurar su eficacia y actualización.



15 CONCLUSIONES

Las instalaciones fotovoltaicas son generalmente seguras, sin embargo, la rápida expansión del sector sin tener afianzados los conocimientos referentes al comportamiento y causas de incendios en la implantación de dicha tecnología está generando una gran inquietud y preocupación derivadas de la existencia de graves siniestros de incendios provocados por dichas instalaciones, llevando a las compañías aseguradas a no suscribir dicho riesgo cuanto están ejecutadas sobre cubiertas y envolventes combustibles.

En España, ni el *Código Técnico de la Edificación*, ni el *Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales* contempla ningún requisito de seguridad contra incendios para dichas instalaciones.

Se requiere por lo tanto, de la intervención de ingenierías especializadas e independientes en seguridad contra incendios que analicen los riesgos y elaboren las pautas a implantar para que la instalación sea segura y eliminar o reducir al máximo riesgos eléctricos, de incendios, problemas estructurales, ambientales y

Para garantizar la seguridad de una instalación fotovoltaica es esencial realizar un buen diseño, instalación y mantenimiento, además, la capacitación adecuada del personal es fundamental para prevenir problemas de seguridad y mitigar riesgos potenciales.

La seguridad de una instalación fotovoltaica es un aspecto crucial que debe tenerse en cuenta para garantizar su correcto funcionamiento y protección contra riesgos potenciales.

A continuación, se presentan algunas conclusiones sobre la seguridad de una instalación fotovoltaica:

- **Identificación y evaluación de riesgos:** Es fundamental realizar una evaluación exhaustiva de los posibles riesgos asociados a la instalación fotovoltaica, como incendios, cortocircuitos, sobrecargas o fallos en el sistema eléctrico. Esto permite tomar las medidas adecuadas para mitigar y prevenir dichos riesgos.
- **Diseño seguro:** El diseño de la instalación fotovoltaica debe incorporar medidas de seguridad apropiadas desde el inicio. Esto incluye la selección de componentes seguros y de calidad, la correcta disposición y fijación de los paneles solares, el dimensionamiento adecuado de los cables y

dispositivos de protección, así como el cumplimiento de las normativas y estándares aplicables.

- **Protección contra incendios:** Los sistemas de protección contra incendios son esenciales en una instalación fotovoltaica. Esto implica análisis de materiales combustibles presentes, la sectorización de elementos críticos, así como la implementación de medidas de protección pasiva, como barreras cortafuegos y revestimientos resistentes al fuego. la instalación de sistemas de detección de incendios, sistemas de extinción automáticos o manuales,
- **Mantenimiento y monitoreo:** Es importante establecer un plan de mantenimiento regular para la instalación fotovoltaica, que incluya la inspección y prueba de los componentes, la limpieza de los paneles solares y el monitoreo del rendimiento del sistema. Esto ayuda a detectar y corregir posibles fallos o problemas de seguridad de manera oportuna.
- **Capacitación y concienciación:** El personal encargado de la operación y mantenimiento de la instalación fotovoltaica debe recibir capacitación adecuada sobre los procedimientos de seguridad, incluyendo la identificación de riesgos, el uso de equipos de protección personal y la respuesta en caso de emergencia. La concienciación sobre la seguridad es clave para prevenir accidentes y minimizar los riesgos.
- **Cumplimiento normativo:** La instalación fotovoltaica debe cumplir con todas las normativas y regulaciones locales, nacionales e internacionales aplicables en materia de seguridad. Esto garantiza que se sigan los estándares de calidad y seguridad establecidos, protegiendo así a las personas y los activos involucrados en la instalación.
- **Ante la ausencia de normativa de seguridad contra incendios nacional para estas instalaciones es imprescindible que un ingeniero independiente de protección contra incendios realice un estudio de seguridad que contemple los riesgos y aplique las soluciones.**

La conclusión de las investigaciones sobre el riesgo de inicio de un incendio en instalaciones fotovoltaicas es baja, cuando hay planificación adecuada de protección contra incendio, cuando se usan componentes de alta calidad, y cuando la instalación se lleva a cabo de forma profesional. No se pueden descartar del todo recalentamientos por envejecimiento de contactos durante el tiempo operativo de la instalación, en el peor de los casos, ello puede llevar a la formación de un arco eléctrico. Los arcos eléctricos de corriente continua no son auto-extinguibles y conllevan así el riesgo de propagación de incendios

por lo que se hace imprescindible realizar inspecciones y mantenimientos regulares. Al igual que la inspección después de acontecimientos especiales, como temporales o terremotos.

En resumen, garantizar la seguridad de una instalación fotovoltaica implica una evaluación adecuada de los riesgos, un diseño seguro, la implementación de medidas de protección contra incendios, un mantenimiento regular, la capacitación del personal y el cumplimiento de las recomendaciones y estándares internacionales. Al seguir estos principios, se puede garantizar un funcionamiento seguro y confiable de la instalación fotovoltaica a lo largo de su vida útil.



16 REFERENCIAS

- M. Tobajas, *Energía solar fotovoltaica*. CEYSA, 2002.
- B. England, “An Investigation into Arc Detection and Fire Safety Aspects of Photovoltaic Installations”, *Murdoch University*, 2012.
- “Diseño de un sistema solar fotovoltaico en una nave industrial del Puerto de Valencia”, *Universidad politécnica de Valencia*, 2016.
- N. G. Dhere y N. S. Shiradkar, “Fire hazard and other safety concerns of photovoltaic systems”, *Journal of Photonics for Energy*, vol. 2, n.º 1, p. 022006, diciembre de 2012. Accedido el 23 de septiembre de 2022.
- N. A. F. Mohd Nizam Ong, M. Z. Mohd Tohir, M. S. Md Said, M. S. Nasif, A. H. Alias y M. R. Ramali, “Development of fire safety best practices for rooftops grid-connected photovoltaic (PV) systems installation using systematic review methodology”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 78, p. 103637, marzo de 2022. Accedido el 23 de septiembre de 2022.
- L. Fiorentini, L. Marmo, E. Danzi y V. Puccia, “Fire Risk Assessment of Photovoltaic Plants. A Case Study Moving from two Large Fires: from Accident Investigation and Forensic Engineering to Fire Risk Assessment for Reconstruction and Permitting Purposes”, *Chemical Engineering Transactions*, vol. 48, 2016. Doi: 10.3303/CET1648072.
- N. Confalonieri, “RIESGO DE INCENDIO EN CONSTRUCCIONES CON MÓDULOS FOTOVOLTAICOS”, *Meridional Seguros*, 2019.
- B. Meacham, B. Poole, J. Echeverria y R. Cheng, *Fire Safety Challenges of Green Buildings*. New York, NY: Springer New York, 2012.



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 varios incidentes que terminaron en incendios catastróficos. Los incendios en sistemas fotovoltaicos instalados en la envolvente de las edificaciones se están convirtiendo en un problema debido a la transmisión del incendio al interior de la edificación, cuando esto ocurre, la combinación de peligros eléctricos, materiales combustibles en espacios con acceso limitado y la limitación de la intervención de bomberos en paneles con presencia de tensión pueden resultar en pérdidas significativas. Teniendo en cuenta que esta tecnología es relativamente nueva y está en un proceso de crecimiento exponencial debido a la crisis energética, pasando de los sectores industriales hasta los sistemas domésticos sin ningún tipo de regulación normativa en materia de seguridad contra incendios.

El presente cuaderno expone los peligros ocultos que conlleva la instalación de celdas de generación solar en cubiertas o en fachadas en edificaciones. Se pone en contexto la tecnología fotovoltaica y se analizan los riesgos asociados a este tipo de instalaciones, sugiriendo medidas de prevención y control dirigidas a mitigar los riesgos.

