



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: SALUD PÚBLICA Y PSIQUIATRIA

**Área de Conocimiento: MEDICINA PREVENTIVA Y SALUD
PÚBLICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE RIESGO DEBIDO A ARCO
ELÉCTRICO EN INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA INDUSTRIAL.
DETERMINACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE
SEGURIDAD Y PROTECCIÓN PARA PERSONAL OPERATIVO DE
ESTAS PLANTAS.**

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

Autor:

D. José Antonio Rodríguez Jiménez

Tutor: Prof. Dr. Rafael Linares Hevilla. Universidad de Málaga

Cotutor: Prof. D. Juan Rafael Cabello García. Universidad de Córdoba.

Málaga, junio 2025



Resumen:

Aunque cada vez es más común encontrar en el Plan de Prevención de Riesgos Laborales de una obra destinada a la construcción de un parque fotovoltaico el riesgo frente a arco eléctrico o “arc flash”, actualmente es prácticamente desconocido para la mayoría de los técnicos en prevención de riesgos laborales. Es por ello, por lo que en este documento se realiza un estudio de las medidas a tomar para evitar este riesgo de origen eléctrico al que actualmente se enfrentan trabajadores sin los EPI`s necesarios. Este documento muestra tanto de manera teórica como práctica el análisis y estudio de medidas de protección frente a arco eléctrico en una instalación fotovoltaica de nueva construcción. En la primera parte del documento se desarrollará teóricamente la importancia de introducir este riesgo en los planes de prevención y en la segunda parte, se analizarán los resultados obtenidos del cálculo tras simular una planta solar fotovoltaica en el software específico ETAP.

Abstract:

Although it is becoming increasingly common to find the risk of electric arc or "arc flash" included in the Risk Prevention Plan for a construction project dedicated to building a photovoltaic park, it is still largely unknown to most occupational risk prevention technicians. For this reason, this document conducts a study on the measures to be taken to avoid this electrical risk, which workers are currently facing without the necessary PPE. This document presents both a theoretical and practical analysis and study of protective measures against electric arc in a newly constructed photovoltaic installation. The first part of the document will theoretically develop the importance of including this risk in prevention plans, and the second part will analyze the results obtained from calculations after simulating a photovoltaic solar plant using the specific software ETAP.

Índice de Contenidos

1.	Marco Introductorio.....	9
1.1.	Definiciones Previas y Acrónimos	9
1.2.	Introducción.....	13
1.3.	Antecedentes.....	16
1.4.	Alcance	17
2.	Descripción de Objetivos.....	18
2.2.	Objetivos Principales	18
2.3.	Objetivos Específicos	18
3.	Metodología de Estudio del Arco Eléctrico	19
3.2.	Descripción de la instalación de estudio.....	19
3.3.	Métodos de Cálculo	19
3.4.	Software empleado	20
3.5.	Niveles de energía y EPI's necesarios	20
3.6.	Distancias de trabajo y seguridad por contacto	23
3.7.	Casos de estudio	24
4.	Resultados.....	29
4.2.	Resultados obtenidos – Validación Software ETAP	29
4.3.	Reducción del Riesgo – Protecciones Colectivas.....	31
4.3.1.	Etiquetado.....	31
4.3.2.	Digitalización de la planta – LiDAR.....	32
4.3.3.	Modificación de parámetros eléctricos.....	33
4.4.	Reducción del Riesgo – Protección individual.....	34
4.4.1.	Ropa frente a Arco Eléctrico	34
4.4.2.	Protección de las extremidades	36
4.4.3.	Protección de la cabeza.....	39
4.5.	Punto Adjunto al PSS	40

4.5.1. Ficha de Formación e Información.....	41
5. Conclusiones y discusión	42
6. Normativa aplicable y Bibliografía	44
6.1. Normativa aplicable.....	44
6.2. Bibliografía.....	45
ANEXO I: Ficha de Formación e Información	47

Índice de Gráficos.

Gráfico 1 Capacidad Solar Instalada en Europa.....	14
Gráfico 2 Capacidad Solar Instalada en España. Fuente: Red Eléctrica Española.....	14
Gráfico 3 Accidentes de trabajo 2015.	15
Gráfico 4 Accidentes de trabajo 2022.	15
Gráfico 5 Etiqueta frente a arco eléctrico. Fuente: SGS.com.....	32

Índice de Tablas

Tabla 1 Requisitos NFPA 70E Tabla 130.5 (G). Elaboración propia.	21
Tabla 2 Valores Típicos IEEE 1584 (2018). Elaboración propia.....	23
Tabla 3 Determinación de distancias restrictivas. Elaboración propia.....	24
Tabla 4 Casos de estudio. Elaboración propia.....	24
Tabla 5 Tabla 130.5(C) de la NFPA 70E	26
Tabla 6 Tabla 130.5(C) de la NFPA 70E	27
Tabla 7 Resultados para Corriente Alterna. Elaboración propia.	29
Tabla 8 Resultados para Corriente Continua.. Elaboración propia.	30
Tabla 9 Clase de los guantes dieléctricos	36

Índice de Figuras

Imagen 1 Imagen tipo VCB. Fuente: IEEE 1584	9
Imagen 2 Imagen tipo VCBB. Fuente: IEEE 1584	10
Imagen 3 Imagen tipo HCB. Fuente: IEEE 1584	10
Imagen 4 Imagen tipo VOA. Fuente: IEEE 1584.....	10
Imagen 5 Imagen tipo HOA. Fuente: IEEE 1584.....	11
Imagen 6 Digitalización zonas centro transformación.	33
Imagen 7 Etiqueta Arco Eléctrico	35
Imagen 8 Marcado de los guantes dieléctricos.....	36
Imagen 9 Guantes Dieléctricos. Fuente: Sofamel.com	37
Imagen 10: Guantes Mecánicos. Fuente: Sofamel.com	37
Imagen 11 Guantes Ignífugos. Fuente: Sofamel.com	37
Imagen 12 Bota de Seguridad Panter Voltio. Fuente: Panter.es.....	38
Imagen 13 Test dieléctrico Panter Voltio. Fuente: panter.es.....	38

Imagen 14 Casco dieléctrico IDRA II	39
Imagen 15 Balaclava para arco eléctrico. Fuente: Buff.com.....	40

MEMORIA

1. Marco Introductorio

1.1. Definiciones Previas y Acrónimos

A continuación, se detallan y explican una serie de conceptos y acrónimos presentes en este informe para mejorar la comprensión de los aspectos fundamentales que engloban al fenómeno del arco eléctrico:

ASTM. *American Society for Testing and Materials* (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales).

ATPV. *Arc Thermal Performance Value* (Valor de Rendimiento térmico de Arco). Indica el valor de energía incidente resultante de un arco eléctrico sobre un determinado material de forma que exista una probabilidad del 50 % de que se produzca una quemadura de 2º grado debido a la transferencia de calor a través de la muestra.

Configuración electrodos. Disposición física de los elementos conductores entre los que se origina el arco eléctrico. Influye en la cantidad de energía que se proyecta hacia las personas. Se detallan los diferentes tipos de configuración en el estándar IEEE 1584: (IEEE SA - IEEE 1584-2018, 2018)

- VCB – *Vertical Conductors in a metal Box* (Conductores verticales en el interior de una envolvente de metal).

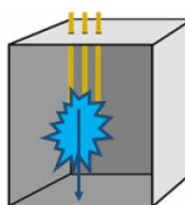


Imagen 1 Imagen tipo VCB. Fuente: IEEE 1584

- VCBB – *Vertical Conductors terminated in an insulating Barrier in a metal Box* (Conductores verticales contra una barrera aislante en el interior de una envolvente de metal).

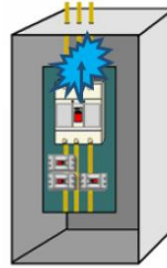


Imagen 2 Imagen tipo VCB. Fuente: IEEE 1584

- HCB – *Horizontal Conductors in a metal Box* (Conductores horizontales en el interior de una envoltura de metal). Denominado *Horizontal Open Tips* en los cuadros de corriente continua.

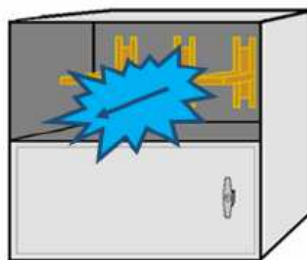


Imagen 3 Imagen tipo HCB. Fuente: IEEE 1584

- VOA – *Vertical conductors in Open Air* (Conductores verticales en intemperie).

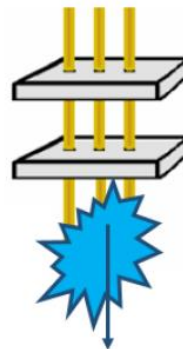


Imagen 4 Imagen tipo VOA. Fuente: IEEE 1584

- HOA – *Horizontal conductors in Open Air* (Conductores horizontales en intemperie).

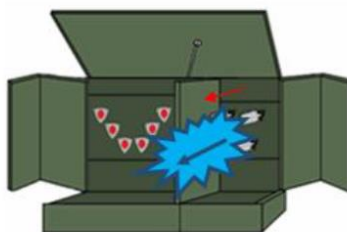


Imagen 5 Imagen tipo HOA. Fuente: IEEE 1584

Distancia de peligro. Distancia que delimita el área en la que la presencia de un trabajador desprotegido supone un riesgo grave e inminente de que se produzca un arco eléctrico, o un contacto directo con el elemento en tensión, teniendo en cuenta los gestos o movimientos normales que puede efectuar el trabajador sin desplazarse. Recogida en el RD 614/2001.

Distancia de proximidad. Define el área delimitada alrededor de la zona de peligro, desde la que el trabajador puede invadir accidentalmente esta última. Recogida en el RD 614/2001.

Distancia de trabajo. Distancia desde el elemento conductor hasta el pecho y la cara del trabajador víctima de un accidente de arco eléctrico. Se emplea para determinar el nivel de energía incidente por radiación térmica. Recogida en la NFPA 70E.

Energía incidente. Cantidad de energía térmica liberada sobre una superficie durante la explosión producida. Se mide normalmente en calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2), aunque también se pueden utilizar los Julios por centímetro cuadrado (J/cm^2).

EPI. Equipo de protección individual.

Frontera o distancia de arco eléctrico. Límite a partir del cual la energía incidente es igual o superior a $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$. Por fuera de este límite no existe riesgo de quemadura de 2º grado. Depende de la corriente de arco y del tiempo de apertura de las protecciones situadas aguas arriba. Recogida en la NFPA 70E.

I>. Valor de ajuste de la unidad a tiempo dependiente para dispositivos de protección.

I>>. Ajuste de la unidad de protección instantánea.

IEC. *International Electrotechnical Commission* (Comité Electrotécnico Internacional).

IEEE. *Institute of Electrical and Electronical Engineers* (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).

Im/Isd. Ajuste de la protección instantánea.

Im/Isd max. Ajuste de la protección instantánea máxima.

In. Intensidad nominal del relé o dispositivo de protección.

Intensidad de arco. Intensidad a partir de la cual se genera el arco eléctrico.

Intensidad de cortocircuito. Corriente eléctrica que circula por una instalación en caso de Aumento brusco de intensidad en la corriente eléctrica de una instalación por la unión directa de dos conductores de distinta fase o entre una fase y tierra.

Ir. Valor de ajuste de la unidad a tiempo dependiente para dispositivos de protección.

Límite de aproximación limitada. A partir de este límite, existe riesgo de choque o descarga eléctrica. Solo puede entrar en esta área personal cualificado o también personal no cualificado bajo la condición de ir acompañado en todo momento por personal cualificado. Es necesario llevar los EPI's apropiados. También depende del nivel de tensión. Recogido en la NFPA 70E.

Límite de aproximación restringida. A partir de este límite, existe riesgo de descarga o choque eléctrico debido a un arco combinado con un movimiento inadvertido. Solo puede entrar dentro de esta zona personal cualificado, con los EPI's apropiados y permiso de trabajo. La distancia de esta frontera depende del nivel de tensión de la instalación. Recogido en la NFPA 70E.

NFPA. *National Fire Protection Association* (Asociación Nacional de Protección frente al Fuego (Estados Unidos)).

Nivel energía. Clasificación de la energía térmica liberada durante la explosión del arco eléctrico en función de la gravedad de las consecuencias para una persona afectada por esta nube de plasma.

Separación electrodos. Distancia entre los elementos conductores donde se origina el arco eléctrico (o entre estos y tierra).

UNE-EN. Una Norma Española – *European Norm* (Norma Europea).

1.2. Introducción

Un arco eléctrico es una descarga disruptiva generada por la ionización de un medio gaseoso (por ejemplo, el aire) entre dos superficies o elementos a diferente potencial. (Formigó, 2011)

El fenómeno producido por el arco eléctrico, denominado arcflash (AF) puede ser definido de forma simplificada como la cantidad de energía térmica, luminosa y sonora emitida como parte de una falla en un sistema de energía eléctrica y que puede generarse de forma caótica provocando una explosión eléctrica. (Cabello et al., 2024; Formigó, 2011)

Debido a las altas temperaturas que se alcanzan en el arco (19.400°C), el aire que rodea la instalación, así como los metales que la conforman se expanden rápidamente provocando que esta explosión se produzca a una alta presión. Como resultado de la presión y temperatura a la que se produce el arco, se produce la vaporización de los metales (Cabello et al., 2024). Estos arcos pueden expulsar pequeñas gotas de metal fundido a más de 1000°C, lo que provoca que la ropa del trabajador entre instantáneamente en ignición. Este riesgo es uno de los más frecuentes a los que se enfrentan los trabajadores de montaje y mantenimiento eléctrico cuando se encuentran trabajando con zonas en tensión. (Campbell & Dini, 2015) En Estados Unidos se estiman en 30000 accidentes debido a arco eléctrico cada año, de los cuales, 7000 son quemaduras de diferentes grados, 2000 son hospitalizaciones y 400 el número de muertes anuales. (O'Connor, 2015)

En este caso estudiamos su efecto en instalaciones fotovoltaicas debido a que en este tipo de instalaciones se encuentran tensiones e intensidades muy elevadas, incrementando la posibilidad de que este riesgo se convierta en accidente. Lo anterior, se puede visualizar en España, como se puede observar en el Gráficos 1 y 2, fue a partir de 2018 cuando la potencia instalada fotovoltaica empezó a crecer exponencialmente y en consecuencia los accidentes de trabajo debido a arco eléctrico.

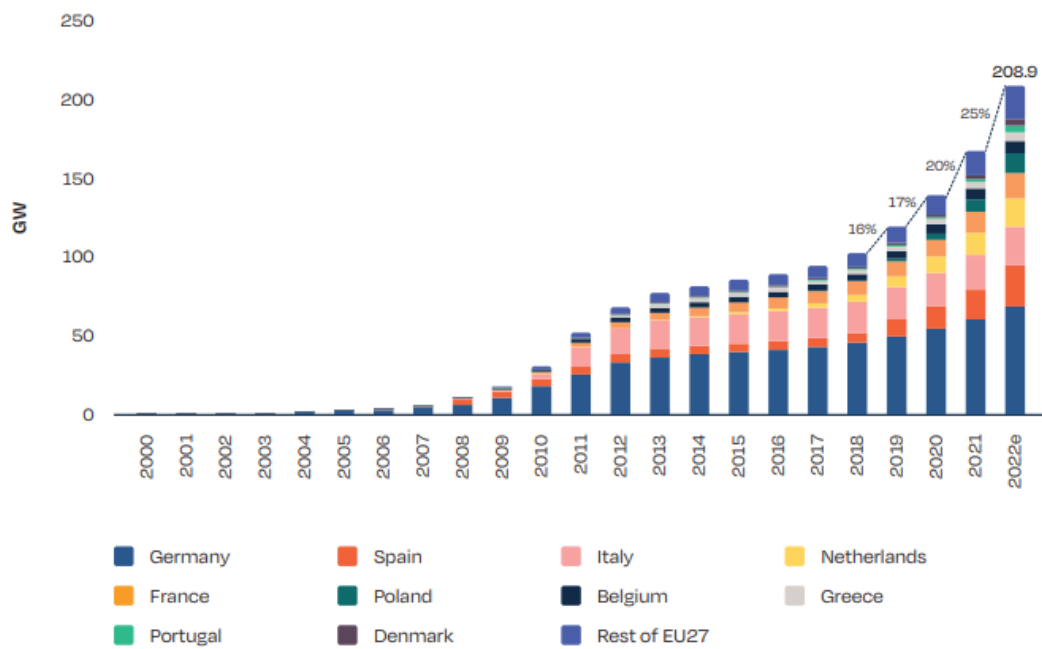


Gráfico 1 Capacidad Solar Instalada en Europa. (WALBURGA HEMETSBERGER et al., 2022)

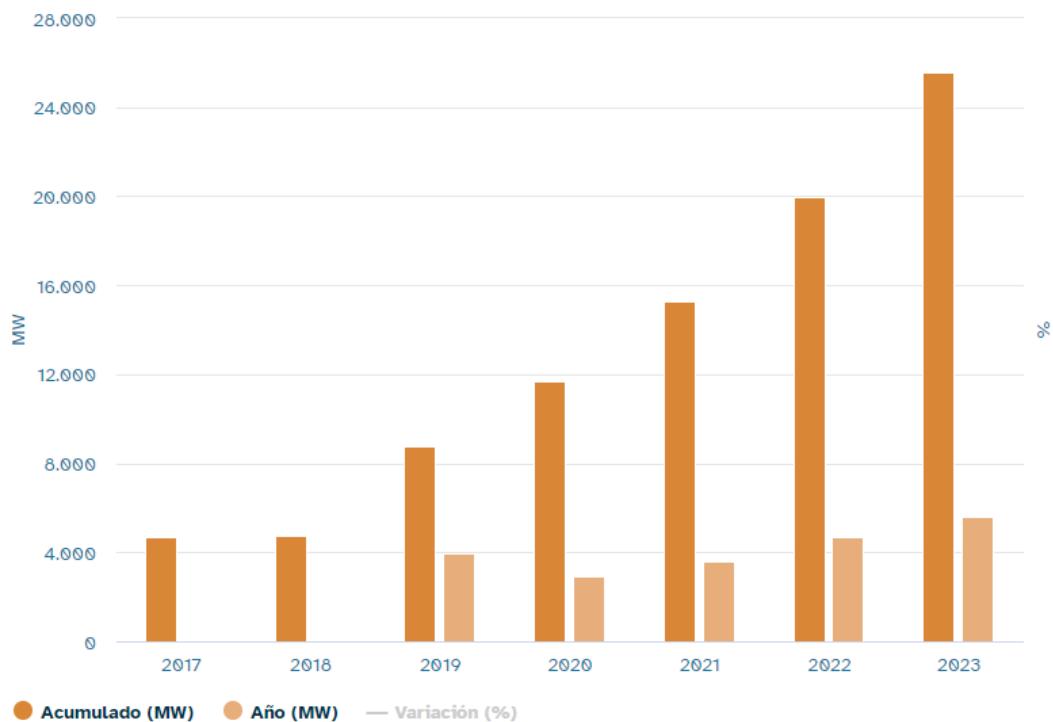


Gráfico 2 Capacidad Solar Instalada en España. Fuente: Red Eléctrica Española.

Para observar que el número de accidentes debido a arco eléctrico en España ha aumentado considerablemente desde antes que se produjera este aumento, podemos extraer los datos de las estadísticas de accidentes de trabajo producidos en España en los

años 2015 y 2022 (última actualización) del Ministerio de Trabajo y Economía Social, observando:

Año 2015	EN JORNADA			
	Total	Leves	Graves	Mortales
TOTAL				
Contacto con corriente eléctrica, fuego, temperatura, sustancias peligrosas	14.441	14.271	147	23
Contacto indirecto con un arco eléctrico, rayo	330	321	9	-
Contacto directo con la electricidad, recibir una descarga eléctrica	419	384	23	12
Contacto con objetos o entornos con elevada temperatura o en llamas	4.665	4.596	59	10
Contacto con objetos o entornos fríos o helados	259	258	1	-

Gráfico 3 Accidentes de trabajo 2015. Fuente: Ministerio de Trabajo y Economía Social.

Año 2022	EN JORNADA			
	Total	Leves	Graves	Mortales
TOTAL				
Contacto eléctrico, con fuego, temperaturas o sustancias peligrosas	55.825	55.635	161	29
Contacto con un arco eléctrico o rayo (pasivo) (sin contacto material con el elemento)	468	459	8	1
Contacto directo con la electricidad, recibir una descarga eléctrica	495	471	18	6
Contacto con llamas directas u objetos o entornos con elevadas temperaturas	6.020	5.935	72	13
Contacto con objeto o entorno frío o helado	372	366	6	-

Gráfico 4 Accidentes de trabajo 2022. Fuente: Ministerio de Trabajo y Economía Social.

Como se observa, se produce un aumento del 42% en accidentes debido a contacto con un arco eléctrico y un aumento del 29% en accidentes debido a contacto con llamas u objetos a alta temperatura. Esto puede ser debido al aumento constante de las instalaciones fotovoltaicas en la industria y el riesgo de arco eléctrico que estas presentan. (Ministerio de Trabajo y Economía social, 2015, 2023)

El primer documento en el que se recogen las ecuaciones para cuantificar los riesgos térmicos asociados al arco eléctrico a diferentes valores de tensión, así como establecer distancias de seguridad fue redactado por Ralph H. Lee en el año 1982. (Formigó, 2011).

El estudio de riesgo asociado a arco eléctrico ha avanzado considerablemente desde que Ralph H. Lee introdujese sus ecuaciones, y lamentablemente, los índices de accidente siguen creciendo.

Actualmente el arco eléctrico controlado es muy usado en la industria, como puede ser en el proceso de soldadura por arco, o en las bujías de encendido de los vehículos. Estos casos han sido estudiados en profundidad con anterioridad y cuentan con excelentes medidas de protección tanto colectivas como individuales.

Al contrario, pasa con el riesgo de arco eléctrico que estudiamos, debido a que no conocemos con exactitud cuando puede producirse ni como puede comportarse, por lo que no existen medidas definidas ya que cada instalación cuenta con una singularidad única.

Según la Ley de Prevención de Riesgos Laborales en su artículo 17: “*El empresario adoptará las medidas necesarias con el fin de que los equipos de trabajo sean adecuados para el trabajo que deba realizarse y convenientemente adaptados a tal efecto, de forma que garanticen la seguridad y la salud de los trabajadores al utilizarlos*” (Boletín Oficial del Estado, 1995). Esto obliga a realizarse el estudio de arco eléctrico, ya que es un riesgo que está presente y aunque latente, puede llegar a provocar accidentes fatales con facilidad si no se cumplen ciertos estándares de seguridad.

Es por lo anterior, por la poca información sobre EPI's para este tipo de riesgo y el aumento considerable de casos que actualmente se produce, por lo que en este documento se desarrollarán las medidas necesarias para poder estudiar y aplicar al plan de seguridad y salud de una instalación fotovoltaica.

1.3. Antecedentes

El estudio del arco eléctrico para calcular el nivel de energía incidente comenzó a estudiarse en 1982, fecha en la que Ralph H. Lee, ingeniero y miembro del IEEE, publicó su informe “El otro riesgo eléctrico: quemaduras por explosión de arco” (*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* en su título original). En este documento Ralph H. Lee hace referencia al arco eléctrico y presenta las primeras ecuaciones para realizar el estudio de nivel de energía incidente.

Tras el hallazgo de Ralph H. Lee, se comenzó a estudiar en profundidad en los años posteriores. En estos años salieron a la luz normas y artículos como la NFPA 70E en EEUU que introducía términos desconocidos como el límite o frontera de arco eléctrico. Esta norma se actualizó en el año 2000, introduciendo estudios para la determinación de equipos de protección individual.

1.4. Alcance

Este documento abarca el análisis y estudio de riesgo de arco eléctrico en una planta de generación fotovoltaica de 25 MWp. Tras la simulación se presentan unos resultados que serán analizados para obtener un determinado nivel de protección.

Para ello se calcula el nivel de energía incidente en los puntos donde es probable que se produzca un incidente, determinándose los límites de seguridad y distancias de protección según normativa. Además, para cada una de estas categorías, se determinará una lista de equipos de protección personal mínimos recomendados para garantizar la seguridad de los operadores que trabajan en el sitio y brindar opciones de protección colectiva, pudiendo utilizarse diferentes métodos, reduciendo así el índice de accidentes debido a este fenómeno.

Finalmente, se crean etiquetas que contienen toda la información necesaria indicando el peligro presente; al colocarse en puertas o armarios eléctricos, servirán como advertencia. Para el estudio se utilizó el programa de cálculo ETAP.

2. Descripción de Objetivos

2.2. Objetivos Principales

El principal objetivo de este estudio es destacar la importancia de estudiar el fenómeno producido por el arco eléctrico denominado arcflash como un riesgo laboral relevante en los sistemas de energía eléctrica. Se busca concienciar sobre la necesidad de adoptar medidas de seguridad adecuadas, en cumplimiento de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, para proteger la salud y la integridad de los trabajadores. Además, se enfatiza que, a diferencia del arco eléctrico, el cual se produce de manera controlada, el arcflash es impredecible y altamente peligroso, lo que dificulta la implementación de medidas de protección estándar, ya que cada instalación presenta características únicas que requieren un análisis específico.

2.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son, en primer lugar, proporcionar una visión teórica completa del fenómeno del arcflash. Esto incluye su origen, sus primeras aplicaciones, las características técnicas, causas y efectos cuando se presenta como un accidente, así como los distintos métodos de protección y seguridad existentes frente a este tipo de defecto.

En segundo lugar, se busca aplicar todos estos conocimientos en un caso práctico, mediante el análisis de una instalación eléctrica real, concretamente una planta fotovoltaica industrial recientemente instalada. Este análisis tiene como objetivo calcular los niveles de energía incidente en los posibles puntos de defecto, determinar los límites de seguridad y las distancias de protección según la normativa vigente, y establecer una lista de equipos de protección individual (EPI) mínimos recomendados para garantizar la seguridad de los operarios.

Tras esto, se proponen alternativas de protección colectiva que contribuyan a reducir al mínimo los daños en caso de accidente por arcflash. Finalmente, se desarrollan etiquetas informativas que recopilan toda la información relevante sobre el riesgo, y que, al colocarse en puertas o envolventes de cuadros eléctricos, funcionen como advertencia para el personal operativo de las plantas fotovoltaicas.

3. Metodología de Estudio del Arco Eléctrico

3.2. Descripción de la instalación de estudio

La instalación se compone de 39 líneas distintas compuestas cada una por 9 strings de módulos fotovoltaicos que desembocan en dos centros de transformación distintos. El primer bloque, compuesto por las líneas de la 1 a la 13, junto con el segundo bloque, compuesto por las líneas de la 14 a la 25, desembocan en el centro de transformación 1. El tercer bloque, compuesto por las líneas de la 26 a la 34, junto con el cuarto bloque, compuesto por las líneas de la 35 a la 39, desembocan en el centro de transformación 2.

Cada línea dispone de su propio inversor que transforma la tensión de corriente continua generada por los paneles a un nivel de 400 V en alterna.

Las salidas de los strings se unen de tres en tres en una caja de unión con una protección de un fusible de 100 A.

3.3. Métodos de Cálculo

Para conocer la gravedad del accidente producido, es necesario llevar a cabo un estudio de cortocircuito y obtener el tiempo máximo de duración del defecto, por lo que se debe calcular la corriente de arco y comparar posteriormente con las curvas de actuación de los dispositivos de protección. Los cálculos se han llevado a cabo de la siguiente manera:

- **Intensidad de cortocircuito.** Cumple la norma IEC 60909.
- **Intensidad de arco.** Para las barras de corriente alterna, cumple con el estándar “IEEE 1584 Arc Flash analysis method” (2018). En los cuadros eléctricos de PUNTOS DE CORRIENTE DC, se aplica el Método 2 del módulo DC Arc Flash de ETAP®, presentado en el taller de seguridad eléctrica de la IEEE/IAS, Louisville, Kentucky en 2015.
- **Actuación de las protecciones,** según marcas, Modelos y parametrizaciones disponibles en la propia librería interna de ETAP®.
- **Cálculo de energía incidente y frontera de arco eléctrico.** Para los puntos de estudio de corriente alterna, el método empleado para obtener la energía y la frontera de arco eléctrico es el desarrollado por la IEEE en su estándar 1584. Para el resto de la instalación eléctrica de corriente continua, se aplica el método desarrollado Stokes y Oppenlander.

3.4. Software empleado

Para la elaboración de este documento es necesario contar con programas avanzados de cálculo eléctrico, software de gestión de datos y ofimática entre los que destacan:

Cálculos eléctricos:

- ETAP v.19.0.1 este software permite diseñar la planta fotovoltaica y extraer conclusiones como puede ser la energía calorífica incidente en caso de arco eléctrico.

Diseño de planos:

- AutoCAD 2024 diseño de planos y esquemas.

Tratamiento de datos:

- Microsoft Excel.

Ofimática:

- Microsoft Word.

3.5. Niveles de energía y EPI's necesarios

Para la clasificación de los cuadros eléctricos y determinación de los Equipos de Protección Individual a emplear, se han seguido los criterios establecidos en la norma NFPA 70E, concretamente, la Tabla 130.5(G) (NFPA 70E: Norma Para La Seguridad Eléctrica En Lugares de Trabajo, 2018)

Nivel	Equipos de Protección Individual
<p>A (0-1,2 cal/cm²)</p>	<p>Camisa de manga y pantalón largos o mono de trabajo, ignífugos o de fibras naturales sin tratar. Casco más pantalla facial contra proyectiles (según se requiera) *. Gafas de seguridad. Protección auditiva. Protección en manos ignífuga, dieléctrica y mecánica. Calzado de seguridad con puntera dieléctrica. Cazadora o parka para arco eléctrico según condiciones meteorológicas.</p>
<p>B (1,2-12 cal/cm²)</p>	<p>Ropa arco eléctrico: Camisa manga y pantalón largos o mono de trabajo. Casco más pantalla facial arco eléctrico más pasamontañas arco eléctrico o casco bajo capucha integral arco eléctrico. Protección manos ignífuga, dieléctrica y mecánica. Gafas de seguridad. Protección auditiva. Calzado de seguridad con puntera dieléctrica. Cazadora o parka para arco eléctrico según condiciones meteorológicas.</p>

C (12-∞ cal/cm ²)	Ropa arco eléctrico: Camisa manga y pantalón largos o mono de trabajo. Casco bajo capucha integral arco eléctrico. Protección manos ignífuga, dieléctrica y mecánica. Gafas de seguridad. Protección auditiva. Calzado de seguridad. Cazadora o parka arco eléctrico según condiciones meteorológicas.
----------------------------------	--

Tabla 1 Requisitos NFPA 70E Tabla 130.5 (G). Elaboración propia.

Cuando un empleado se encuentre trabajando dentro de la frontera de arco eléctrico y si existe la posibilidad de que se produzca un arco eléctrico (según la tarea que se lleva a cabo), deberá hacer uso de ropa de protección y otros equipos de protección individual apropiados para prevenir posibles heridas graves debidas al propio arco, destellos de luz o partículas proyectadas resultantes de la explosión eléctrica.

Todas las partes del cuerpo que se encuentren en el interior de la frontera de arco eléctrico deben estar protegidas. Los EPI de protección de arco deben haber sido ensayados según los estándares IEC 61482 o ASTM F1959/F1959M para garantizar una correcta protección frente a los efectos térmicos del arc flash.

- **Protección del cuerpo.**

La ropa de protección contra arco eléctrico debe cubrir la mayor parte del cuerpo para garantizar la máxima seguridad. Las prendas deben permanecer completamente cerradas hasta el cuello, sin botones desabrochados ni cremalleras abiertas.

Las camisas deben ir metidas dentro del pantalón y no deben remangarse. Se recomienda evitar tallas muy ajustadas, ya que las prendas más amplias generan espacios de aire que actúan como aislamiento térmico adicional. Es posible combinar diferentes capas de ropa con protección contra arco eléctrico para lograr un mayor valor de ATPV (Valor de Rendimiento Térmico de Arco), siempre que las capas hayan sido ensayadas juntas como conjunto. De lo contrario, solo se podrá considerar el valor más alto de una de las prendas.

Se permite el uso de ropa interior hecha de fibras inflamables que no se derritan, siempre que la ropa exterior impida la rotura durante una exposición a arco, evitando así la ignición de la capa interior. Sin embargo, las prendas no certificadas como protección de arco no se pueden considerar como una capa de protección adicional. Si se usan prendas exteriores adicionales por motivos climáticos u otros, estas también deben ser resistentes al arco, aunque no es necesario que tengan el mismo ATPV que las capas interiores, siempre que estas últimas garanticen la protección adecuada. No deben utilizarse prendas

que contengan materiales sintéticos inflamables que se derritan por debajo de los 315 °C, como nylon, poliéster, acetato, polietileno, entre otros, a menos que estén certificadas como ropa de protección contra arco y hayan pasado los ensayos sin mostrar signos de derretimiento o goteo.

Tampoco se deben usar estos materiales en capas interiores, excepto cuando se trate de cantidades mínimas de tejido elástico en ropa interior o calcetines. Toda la ropa de arco debe cubrir cualquier prenda inflamable del trabajador, permitiendo al mismo tiempo la movilidad y visibilidad necesarias para la tarea. La elección del equipo dependerá del tipo de trabajo, ubicación y condiciones específicas. En el caso de los trajes integrales, estos deben poder retirarse fácilmente en caso de emergencia, y tanto el traje como la capucha deben tener un ATPV adecuado a la energía incidente prevista. Si se emplean sistemas de ventilación en la capucha, tanto las mangueras como los componentes deben estar fabricados con materiales resistentes al arco o ignífugos que no se derritan al calor.

- **Protección de la cabeza.**

Cuando la parte posterior de la cabeza se encuentre dentro de la frontera de arco eléctrico durante los trabajos, se deberá hacer uso también de pantalla facial combinada con bragas de cuello o pasamontañas de arco eléctrico o capucha integral de arco eléctrico. Cuando la energía incidente sea superior a 12 cal/cm² (50,2 cal/cm²) se debe hacer uso de este tipo de capuchas.

- **Protección de los oídos.**

Los operarios deben hacer uso de protección auditiva cuando se encuentren trabajando dentro de la frontera de arco eléctrico. Se recomienda el uso de tapones, ya que permiten una mayor comodidad y compatibilidad con el uso de otros EPIs como pueden ser pasamontañas o capuchas de arco eléctrico. Se adaptan al canal auditivo con facilidad y ofrecen una adecuada protección.

- **Protección de las manos.**

Cuando exista riesgo de contacto eléctrico con una parte energizada de un circuito eléctrico, los trabajadores deben utilizar guantes de protección ignífuga por debajo de los guantes aislantes y, por encima de estos últimos, guantes de protección mecánica cuando exista riesgo de cortar o punzar la protección dieléctrica.

- **Protección de los pies.**

El calzado de protección o calzado dieléctrico (o ambos) ofrecen cierta protección frente al arco eléctrico y se deben utilizar cuando la energía incidente supere las 4 cal/cm² (16,75 J/cm²).

Los equipos de protección individual deben ser siempre inspeccionados antes de realizar cualquier tarea con ellos y ser desechados en caso de que presenten daños o defectos o tras un accidente. Además, se deben seguir las recomendaciones del fabricante en lo que respecta a su uso, almacenamiento y vida útil o caducidad.

La principal función de estos EPI es la protección de las personas frente al arc flash y contacto eléctrico

3.6. Distancias de trabajo y seguridad por contacto

Las distancias de trabajo se aplican en función de las características individuales de cada cuadro eléctrico, siguiendo los valores típicos recogidos en la IEEE 1584 (2018).

Clase de equipo	Distancia de trabajo típico (cm)
Cable Solar, de BT y MT	45,7
Cuadros eléctricos y Centros de Control de Motores de Baja Tensión	45,7
Celdas y aparata de Baja Tensión	61
Aparata de 5 kV	91
Aparata de 15 kV	91

Tabla 2 Valores Típicos IEEE 1584 (2018). Elaboración propia.

Las distancias de seguridad por contacto eléctrico se aplican según lo establecido en el R.D. 614/2001 de 8 de junio y la norma NFPA 70E, de tal forma que se garantice en todo momento el cumplimiento de las distancias mínimas de protección según ambos estándares.

A continuación, se muestra en la siguiente tabla el procedimiento seguido para seleccionar las distancias más restrictivas de entre la diferente normativa aplicable. En las filas de la tabla, se incluyen las diferentes distancias de cada estándar para cada uno de los niveles de tensión presentes en toda la instalación.

En las columnas, las diferentes distancias de seguridad, considerando similares el límite de aproximación restringido y las distancias de peligro y, por otro lado, el límite de aproximación limitado y las distancias de proximidad.

Se sombrea en color azul las celdas con los valores más restrictivos, es decir, los más elevados y que serán seleccionados para incluir en las etiquetas de advertencia de riesgo por arco eléctrico y en las tablas de resultados.

Tensión (Kv)	Estándar	Limite Aproximación Restringido (cm)		Limite Aproximación Limitado (Cm)	
		Distancia Peligro 1 (cm)	Distancia Peligro 2 (cm)	Conductor Fijo	Conductor Móvil
				Distancia Proximidad 1 (cm)	Distancia Proximidad 2 (cm)
< 1	NFPA 70E	30	30	100	300
	RD 614/2001	50	50	70	300

Tabla 3 Determinación de distancias restrictivas. Elaboración propia.

3.7. Casos de estudio

Se realizan los casos de estudio que se muestran en la siguiente tabla:

ZONA DE LA INSTALACIÓN Y CASO DE ESTUDIO	NIVEL DE TENSIÓN (Método de cálculo)	ESTUDIO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	Nº CASO ESTUDIO
AC	Alta Tensión (EPRI)	<i>IccMax</i>	01
		<i>IccMin</i>	02
	Baja Tensión (IEEE)	<i>IccMax</i>	03
		<i>IccMin</i>	04
DC	Máxima Potencia (DOAN)	<i>N/A</i>	05

Tabla 4 Casos de estudio. Elaboración propia.

Aclaraciones:

- IccMax hace referencia a que, para el caso de estudio concreto, se ha calculado la intensidad de cortocircuito máxima.
- Para el cálculo de la falta en corriente continua se ha optado por el método de máxima potencia. Nos proporcionará el caso más desfavorable y se escogerá la protección más adecuada para todos los casos.

Se realiza únicamente el estudio de cortocircuito trifásico debido a la probabilidad de que un arco fase-tierra evolucione a un accidente trifásico a causa de la ionización del aire.

Las siguientes tablas muestran una recopilación de algunas de las diferentes tareas y maniobras comunes que se pueden llevar a cabo en una instalación eléctrica, donde se establece la posibilidad de que se produzca un accidente de arco eléctrico, en función del estado de la instalación. Dichas tablas corresponden con la Tabla 130.5(C) de la NFPA 70E.

Tarea, operación o maniobra	Condición del equipo	Posibilidad de que se produzca un arco eléctrico
Para instalaciones en CA, trabajo en conductores o partes del circuito energizadas, incluyendo la verificación y medición de tensión.	Cualquiera	SÍ
Para instalaciones en CC, trabajo en conductores o partes del circuito energizadas en una batería de celdas conectadas en serie, incluyendo la verificación y medición de tensión		
Retirada o instalación de interruptores.		
Apertura de puertas o envolventes o retirada de cubiertas de tornillos de manera que conductores o partes del circuito energizadas queden expuestas. Para instalaciones en CC, esto incluye cubiertas de protección como, por ejemplo, las protecciones de los terminales de las baterías.		

Puesta a tierra temporal de los equipos, después de verificar la tensión.		
Trabajo en circuitos de control con elementos energizados y expuestos cuya tensión sea superior a los 120 V.		
Instalación o retirada de unidades individuales de arranque en cuadros de control de motores (CCM).		
Inserción o retirada (racking) de interruptores o de unidades de arranque en celdas, estando las puertas de la envolvente abiertas o cerradas.		
Conexión o desconexión de dispositivos en embarrados		
<ul style="list-style-type: none"> • Inspección o evaluación de cables aislados con manipulación. 		
Trabajo en partes energizadas y expuestas alimentadas directamente desde cuadros eléctricos.		
Conexión o desconexión de unidades de medida (kWh en tensión e intensidad del primario).		
Instalación o retirada de cubiertas de protección conductoras para los conectores entre celdas en bancos de baterías.		
Maniobrar un interruptor por primera vez tras su instalación o al terminar un trabajo de mantenimiento sobre el equipo.		
Para instalaciones en CC, trabajo en partes energizadas y expuestas alimentadas directamente desde una fuente CC.		

Tabla 5 Tabla 130.5(C) de la NFPA 70E

Tarea, operación o maniobra	Condición del equipo	Posibilidad de que se produzca un arco eléctrico
Apertura de transformadores de tensión o de potencia.	Cualquiera	SÍ
Apertura de seccionador en exterior (apertura individual de los polos con pértiga), desde 1 kV hasta 15 kV.		
Apertura de seccionador en exterior (apertura conjunta de los polos mediante mecanismo), desde 1 kV hasta 15 kV.		
Mantenimiento y ensayo de celdas individuales o varias unidades en bancos de baterías en espacios abiertos.	Anormal	SÍ
Instalación o retirada de celdas individuales o varias unidades en bancos de baterías en espacios abiertos.		
Aparar de tipo Arc Resistant de tipo 1 o 2 (para tiempos de apertura de menos de 0,5 segundos con una potencial corriente de defecto que no exceda las características resistentes al arco del equipo) y aparar en envolventes de metal, con fusible o sin él, cuyas características constructivas sean resistentes al arco, desde 1 kV hasta 15 kV.		
Inserción o retirada (Racking) de interruptores en celdas.		
Conexión o desconexión (Racking) de dispositivos de puesta a tierra.		
Conexión o desconexión de transformadores de tensión al embarrado.		

Tabla 6 Tabla 130.5(C) de la NFPA 70E

Se considera que la condición del equipo es normal si se cumplen todas las circunstancias siguientes:

- El equipo está adecuadamente instalado, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y a las normas y estándares industriales aplicables.
- El equipo cuenta con un mantenimiento adecuado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y a las normas y estándares industriales aplicables.
- El equipo es utilizado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- Las puertas o cubiertas de la envolvente del equipo están cerradas, colocadas y aseguradas.
- No existen indicios de que se produzca un defecto inminente como puede ser un arco, calentamiento por sobrecarga o malas conexiones, daños o defectos visibles, etc.

4. Resultados

4.2. Resultados obtenidos – Validación Software ETAP

A continuación, se muestran los resultados más relevantes obtenidos para el caso de estudio. En esta tabla se muestran únicamente los datos necesarios para verificar posteriormente los EPIS que deben incluirse en la Evaluación de riesgos, la instalación se supone finalizada y con un correcto mantenimiento.

Lado Corriente Alterna:

ID Punto Cálculo	Nivel energía	Energía Incidente (cal/cm ²)	Frontera Arco Eléctrico (m)
UNION AC 14-25	B	4,720	1,077
ENTRADA LÍNEAS 1-13	B	4,700	1,074
ENTRADA LÍNEAS 14-25	B	4,700	1,074
SALIDA AC INV-1	A	0,174	0,172
UNION AC 1-13	B	3,890	0,954
ENTRADA LINEAS 35-39	B	2,770	0,726
ENTRADA LINEAS 26-34	B	2,760	0,725
SALIDA AC INV-35	B	2,730	0,764
SALIDA AC INV-36	B	2,730	0,764
SALIDA AC INV-37	B	2,730	0,764
UNION AC 26-34	B	2,420	0,709
PRIMARIO T1	A	1,160	0,893
PRIMARIO T2	A	0,599	0,592
SALIDA AC INV-14	A	0,175	0,172
SALIDA AC INV-15	A	0,175	0,172

Tabla 7 Resultados para Corriente Alterna. Elaboración propia.

Lado Corriente Continua:

ID Punto Cálculo	Nivel energía	Energía Incidente (cal/cm ²)	Frontera Arco Eléctrico (m)
DC-1.1.1	B	2,52	0,662
DC 1.1.2	B	2,51	0,662
DC-1.1.3	B	2,52	0,662
DC-1	B	2,52	0,662
DC-2.1.1	B	2,52	0,662
DC-2.1.2	B	2,51	0,662
DC-2.1.3	B	2,52	0,662
DC-2	B	2,52	0,662
DC-3.1.1	B	2,52	0,662
DC-3.1.2	B	2,52	0,662
DC-3.1.3	B	2,52	0,662
DC-3	B	2,52	0,662
DC-4.1.1	B	2,52	0,662
DC-4.1.2	B	2,52	0,662
DC-4.1.3	B	2,51	0,662

Tabla 8 Resultados para Corriente Continua.. Elaboración propia.

Como podemos observar en la mayoría de los casos tenemos un nivel de energía bastante elevado (Ver Tabla 1) lo que conlleva a los trabajadores a tomar medidas adicionales de seguridad en trabajos en tensión.

Actualmente en las obras de construcción de parques fotovoltaicos no incluyen – por desconocimiento – el riesgo frente a arco eléctrico en sus planes de prevención de riesgos laborales, pero como podemos observar en las tablas anteriores el riesgo de arco eléctrico existe y debemos reducirlo en la medida de lo posible.

4.3. Reducción del Riesgo – Protecciones Colectivas

4.3.1. Etiquetado

Cuando se prevén trabajos en zonas con tensión ya sean de mantenimiento, conexión, desconexión, ajuste o inspección y exista riesgo de arco eléctrico, los elementos tras haber sido analizados con el software ETAP deberán ser etiquetados convenientemente según lo establecido en el estándar NFPA 70E, punto 130.5 (H). (NFPA 70E: Norma Para La Seguridad Eléctrica En Lugares de Trabajo, 2018)

Estas etiquetas deben fijarse permanentemente al equipo, así como informar adecuadamente del riesgo presente en ese punto concreto de la instalación, ser fácilmente interpretables y no deteriorarse fácilmente. Estas etiquetas deben contener como mínimo:

- Tensión nominal del sistema.
- Frontera de arco eléctrico.
- Al menos uno de los siguientes:
 - Energía incidente calculada y su correspondiente distancia de trabajo o la categoría de EPI's de arco según las tablas 130.7(C)(15)(a) o (b) de la NFPA 70E, pero no ambos.
 - ATPV mínimo EPI's.
 - Nivel EPI's específico de la planta.

Este tipo de etiquetas permite que los trabajadores conozcan de manera previa los riesgos a los que se exponen, así como los EPIS necesarios para poder realizar su trabajo en condiciones de máxima seguridad.

Es importante que cualquier cambio de los parámetros eléctricos en las zonas de trabajo se someta de nuevo a estudio para evaluar la posibilidad de incremento de energía incidente, este cambio debe quedar completamente documentado.

A continuación, se propone un modelo de etiqueta, la cual cumple con el estándar y además de los pictogramas normalizados relativos a peligro por electricidad, advertencias sobre los riesgos eléctricos presentes y la información específica del arco eléctrico, se incorpora una sección dedicada a la protección contra el choque eléctrico.

Esta sección detalla las distancias mínimas de seguridad en función del nivel de tensión, así como la tensión nominal del sistema y la clase mínima de guantes aislantes exigida, conforme a la normativa vigente, para garantizar la adecuada protección del operario

frente a contactos directos o indirectos con partes energizadas. Las distancias de seguridad por choque eléctrico se detallan en el RD 614/2001. Considerándose para el estudio las distancias más desfavorables. (BOE-A-2001-11881 Real Decreto 614/2001, de 8 de Junio, Sobre Disposiciones Mínimas Para La Protección de La Salud y Seguridad de Los Trabajadores Frente al Riesgo Eléctrico., n.d.)

 <div style="display: inline-block; background-color: red; color: white; padding: 5px; text-align: center;">  PELIGRO </div> 	
Peligro de arco eléctrico y descarga en trabajos en tensión Obligatorio uso de Equipos de Protección Individual apropiados	
Protección contra arco eléctrico Límite de arco eléctrico: 1,287 m Energía incidente: 7,81 cal/cm² Distancia de trabajo: 45,7 cm Nivel energía NFPA 70E: B	Protección contra choque eléctrico Dist. de peligro – 1/2: 50/50 cm Dist. de proximidad – 1/2: 100/300 cm Riesgo exposición choque: 0,4 kV CA Clase guantes aislantes: 00
EPI's mínimos requeridos: Ropa arco eléctrico (AE): Camisa manga larga y pantalón largo o mono de trabajo o traje completo. Pantalla facial AE y pasamontañas AE o capucha AE. Guantes ignífugos. Guantes AE o guantes aislantes (ver clase) y sobreguante de cuero. Casco. Gafas de seguridad. Protección auditiva. Calzado de seguridad.	
Equipo: La ropa de arco eléctrico debe tener un ATPV según el estándar IEC 61482 igual o superior a la energía incidente calculada que garantice protección frente arc flash. Cambios en la configuración de los equipos o del sistema pueden llevar a situaciones de riesgo. Los valores calculados y EPI's requeridos no serían válidos.	Fecha:

Gráfico 5 Etiqueta frente a arco eléctrico. Fuente: SGS.com

4.3.2. Digitalización de la planta – LiDAR

Gracias a la integración de la tecnología LiDAR, es posible escanear las áreas de afección de un arco eléctrico previamente a su electrificación y señalar los puntos en los que es posible que se produzca un arco eléctrico, pudiendo entrenar a los operadores de manera previa a los trabajos.

Este entrenamiento, el cual puede ser en un aula de formación, es crucial para que los trabajadores conozcan la zona de manera previa a la ejecución de los trabajos.

 PELIGRO Peligro de arco eléctrico y descarga en trabajos en tensión Obligatorio uso de Equipos de Protección Individual apropiados	
Protección contra arco eléctrico Límite de arco eléctrico: 1,287 m Energía incidente: 7,81 cal/cm ² Distancia de trabajo: 45,7 cm Nivel energía NFPA 70E: B	Protección contra choque eléctrico Dist. de peligro - 1/2: 50/50 cm Dist. de proximidad - 1/2: 100/300 cm Riesgo exposición choque: 0,4 kV CA Clase guantes aislantes: 00
EP's mínimos requeridos: Ropa arco eléctrico (AE), Camisa manga larga y pantalón largo o mono de trabajo o traje completo, Pantalla facial AE y pasamanos para AE o capucha AE, Guantes ignífugos, Guantes AE o guantes aislantes (ver clase) y sobretuque de cuero, Casco, Gafas de seguridad, Protección auditiva, Calzado de seguridad.	
Equipo: _____ Fecha: _____	
La zona de arco eléctrico debe tener un ATPV según el estándar IEC 61482 igual al superior a la energía incidente calculada que garantiza protección frente a un flash. Cambios en la configuración de los equipos o del sistema pueden llevar a situaciones de riesgo. Los valores calculados y EP's requeridos no serán válidos.	

 PELIGRO Peligro de arco eléctrico y descarga en trabajos en tensión Obligatorio uso de Equipos de Protección Individual apropiados	
Protección contra arco eléctrico Límite de arco eléctrico: 1,287 m Energía incidente: 7,81 cal/cm ² Distancia de trabajo: 45,7 cm Nivel energía NFPA 70E: B	Protección contra choque eléctrico Dist. de peligro - 1/2: 50/50 cm Dist. de proximidad - 1/2: 100/300 cm Riesgo exposición choque: 0,4 kV CA Clase guantes aislantes: 00
EP's mínimos requeridos: Ropa arco eléctrico (AE), Camisa manga larga y pantalón largo o mono de trabajo o traje completo, Pantalla facial AE y pasamanos para AE o capucha AE, Guantes ignífugos, Guantes AE o guantes aislantes (ver clase) y sobretuque de cuero, Casco, Gafas de seguridad, Protección auditiva, Calzado de seguridad.	
Equipo: _____ Fecha: _____	
La zona de arco eléctrico debe tener un ATPV según el estándar IEC 61482 igual al superior a la energía incidente calculada que garantiza protección frente a un flash. Cambios en la configuración de los equipos o del sistema pueden llevar a situaciones de riesgo. Los valores calculados y EP's requeridos no serán válidos.	



Imagen 6 Digitalización zonas centro transformación. Fuente: Internet.

4.3.3. Modificación de parámetros eléctricos

Para no tener que “armar” a los operarios de las plantas fotovoltaicas en exceso, en algunas ocasiones se opta por la modificación o instalación de nuevos relés de protección frente a arco eléctrico.

Existen varias referencias en el mercado, las cuales tratan de detectar la presencia o la formación de un arco eléctrico, incidiendo directamente sobre las protecciones reduciendo el tiempo de disparo de estas y por ende el tiempo de corte del arco eléctrico.

Reduciendo los tiempos de disparo de las protecciones se consigue una reducción significativa de la energía incidente, pudiendo bajar el grupo en el cual se ha categorizado el elemento

4.4. Reducción del Riesgo – Protección individual

4.4.1. Ropa frente a Arco Eléctrico

Para poder conocer con exactitud los requisitos de la ropa para arco eléctrico, debemos consultar la norma UNE-EN 61482-2:2021 *Trabajos en tensión. Ropa de protección contra los peligros térmicos de un arco eléctrico. Parte 2: Requisitos*

Cada prenda o sistema de prendas que cumpla con UNE-EN 61482-2:2021 debe tener una etiqueta de marcado que deberá contener al menos los siguientes elementos de marcado:

- Nombre, marca comercial u otro medio de identificación del fabricante o de su representante autorizado;
- Designación del tipo de producto, nombre comercial o código;
- Designación de tamaño de acuerdo con el capítulo 6 de la Norma ISO 13688:2013;
- Etiquetado de cuidados según las Normas ISO 3758 y/o ISO 30023;
- Símbolo IEC 60417-6353 (2016-02) – Protección contra el efecto térmico del arco eléctrico – y, junto al símbolo, el número de la norma EN correspondiente (EN 61482-2) y la protección térmica del arco en forma de característica de arco ELIM y/o clase de protección de arco (APC 1 o APC 2).

Además, cada prenda deberá estar fabricadas con materiales ignífugos, resistentes al calor y en el caso de cazadoras con varias capas deben cumplir lo siguiente tras su ensayo en laboratorio:

Propiedad	Requisito
Propagación de la llama	Ninguna muestra debe permitir que ninguna parte del límite más bajo de cualquier llama alcance el borde superior o vertical.
Restos inflamados	Ninguna muestra debe desprender restos inflamados o fundidos.
Formación de agujeros	Ninguna muestra debe presentar formación de agujeros de 5 mm o más en cualquier dirección.
Incandescencia residual	El tiempo de incandescencia residual debe ser ≤ 2 s. La incandescencia dentro del área carbonizada se define en la Norma ISO 15025 como incandescencia sin combustión y, a los efectos del apartado 4.3.3.3, no se debe considerar como incandescencia.
Postcombustión	El tiempo de postcombustión debe ser ≤ 2 s.

También deben cumplir con requisitos mecánicos como:

- Resistencia al desgarro de al menos 15N.
- Resistencia a la tracción de al menos 400N.
- Resistencia al estallido de al menos 100 kPa.
- Variación dimensional tras limpieza de un +- 3%

El símbolo anteriormente descrito deberá estar cosido en el interior de la ropa, de forma permanente, siendo este el siguiente;

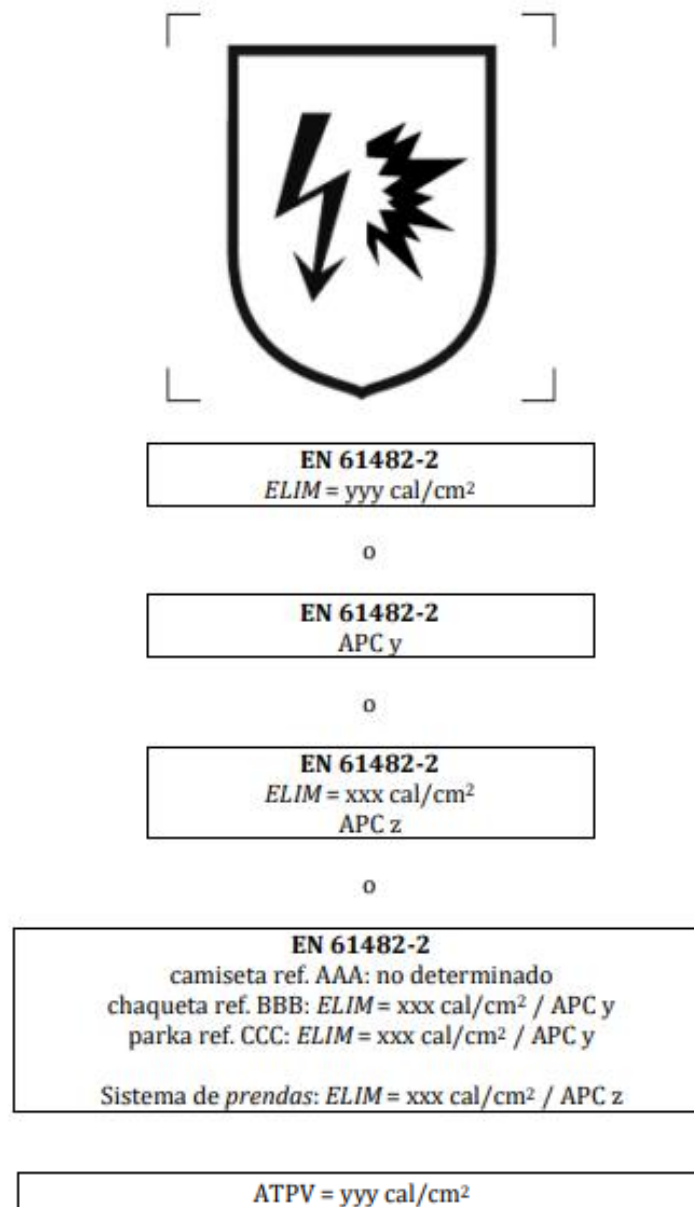


Imagen 7 Etiqueta Arco Eléctrico

4.4.2. Protección de las extremidades

Al tratarse el arco de un fenómeno de tipo eléctrico, es necesario que las extremidades queden completamente cubiertas y aisladas para prevenir una posible derivación a tierra y por tanto la creación de un arco eléctrico.

Para cubrir las manos, tal y como se ha descrito anteriormente será necesario incorporar guantes de protección dieléctrica adecuados para el nivel de tensión presente. Estos guantes bien deberán estar provistos de protección mecánica y térmica o se deberán prever también este tipo de protecciones.

La clase de los guantes dieléctricos según su nivel de tensión se aplica en función de lo establecido en la norma UNE-EN 60903.

Marcado de los guantes:

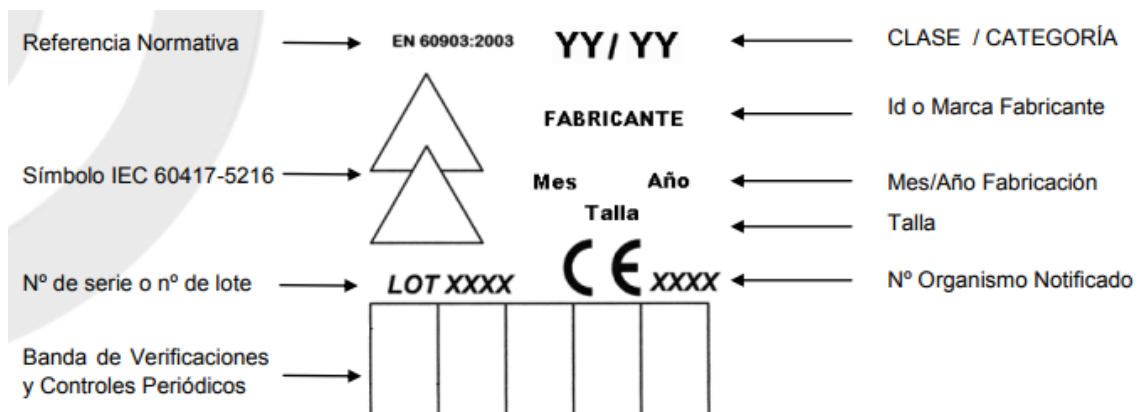


Imagen 8 Marcado de los guantes dieléctricos. (Guantes Aislantes de La Electricidad, INSST.)

Clase:

Clase	Tensión alterna eficaz Vef.	Tensión continua V
00	500	750
0	1 000	1 500
1	7 500	11 250
2	17 000	25 500
3	26 500	39 750
4	36 000	54 000

Tabla 9 Clase de los guantes dieléctricos (Guantes Aislantes de La Electricidad, INSST.)



Imagen 9 Guantes Dieléctricos. Fuente: Sofamel.com



Imagen 10: Guantes Mecánicos. Fuente: Sofamel.com



Imagen 11 Guantes Ignífugos. Fuente: Sofamel.com

Para proteger los pies, los zapatos de seguridad deberán ser de tipo bota y fabricados con materiales que de tipo dieléctrico, ignífugo y antiestático.

La norma **UNE-EN 50321:2018**, relativa al **calzado aislante de la electricidad para trabajos en instalaciones de baja tensión**, establece los requisitos que deben cumplir estos equipos de protección individual. Respecto a las condiciones que los zapatos deben cumplir, se resaltan los siguientes elementos:

El zapato debe proporcionar seguridad contra tensiones de trabajo de hasta 1000 V en corriente alterna (CA) y hasta 1500 V en corriente continua (CC). Para asegurar esta protección, necesita superar pruebas dieléctricas, en las que se ejerce una tensión eléctrica a una muestra y para superarlas no debe sufrir perforaciones ni corrientes de fuga desmedidas.

Los calzados deben ser fabricados con materiales aislantes eléctricamente, sin componentes conductores (como componentes metálicos), y sus partes deben resistir el desgaste, la humedad y sustancias contaminantes habituales, como aceites e hidrocarburos. (UNE-EN 50321-1:2018 Trabajos En Tensión. Calzado de Protección, 2018.)

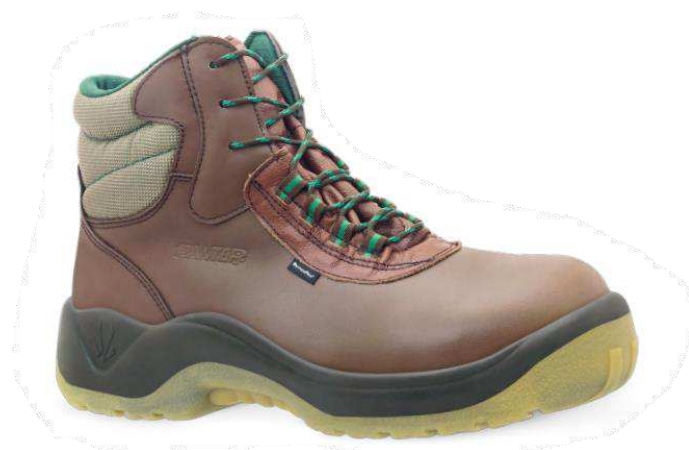


Imagen 12 Bota de Seguridad Panter Voltio. Fuente: Panter.es

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO REALIZADO AL MODELO VOLTIO RESULT OF ELECTRICAL INSULATION TEST USING VOLTIO MODEL		
Datos avalados según el informe N° 11322102 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo		Data certified in report number 11322102 from the National Occupational Health and Safety Institute
CONDICIONES DE LA PRUEBA: Temperatura: 23° ± 5 °C Humedad: 30% ± 2%		TEST CONDITIONS: Temperatura: 23° ± 5 °C Humedad: 30% ± 2%
MUESTRA / Sample	22102/3	22102/4
CLASE ELÉCTRICA / Electrical Class	00	0
NIVEL DE AGUA / Water level	58 mm	58 mm
INTENSIDAD DE FUGA A LA TENSIÓN DE LA PRUEBA Leak intensity at test voltage	0.12 mA	0.18 mA
TENSIÓN SOPORTADA / Voltage withstood	6 KV	10 KV

Imagen 13 Test dieléctrico Panter Voltio. Fuente: panter.es

4.4.3. Protección de la cabeza

La función principal del casco dieléctrico es proteger la cabeza del usuario tanto frente a impactos mecánicos como ante riesgos derivados del contacto con la electricidad. Este tipo de casco es ideal para tareas en instalaciones de baja y media tensión, donde es fundamental minimizar la posibilidad de transmisión eléctrica a través del equipo de protección.

Una de sus características es su capacidad dieléctrica, lo que significa que está fabricado con materiales no conductores que impiden el paso de corriente eléctrica.

Además de su resistencia eléctrica, el casco IDRA 2 ofrece protección contra golpes, caídas de objetos y posibles perforaciones, gracias a su estructura reforzada. Dispone de un sistema de ajuste interno que permite adaptarlo con firmeza y comodidad a la cabeza del usuario, evitando desplazamientos durante el trabajo. Este casco cuenta también con pantalla para prevenir el golpe de fuego, partículas en proyección, etc de un arco eléctrico.

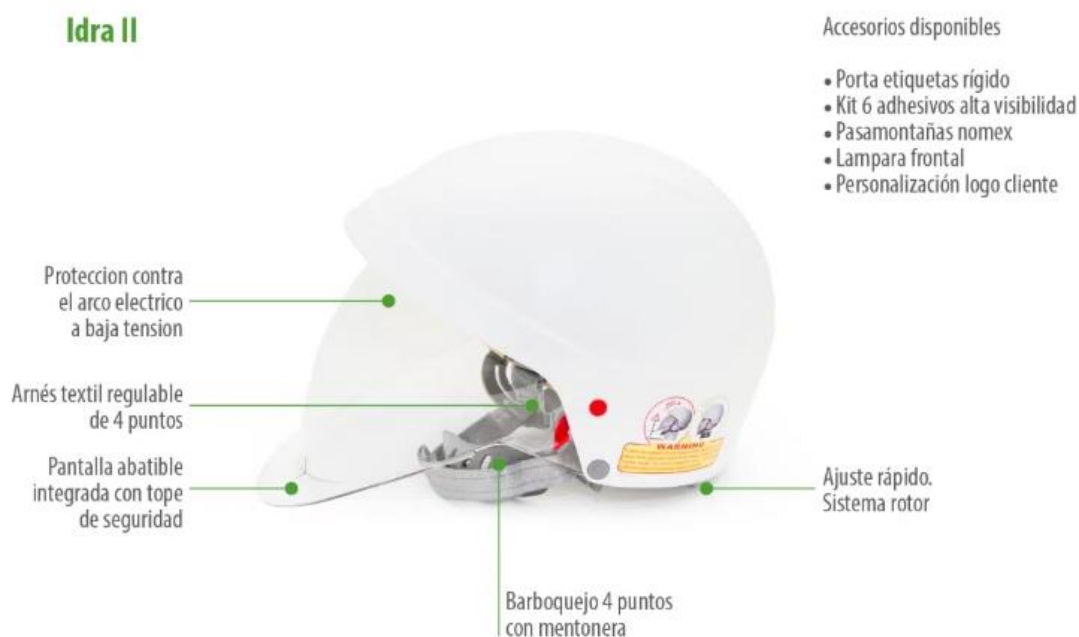


Imagen 14 Casco dieléctrico IDRA II

Es importante también proteger el cuello y cabeza contra los riesgos térmicos derivados de un arco eléctrico, para ello es necesario que el trabajador incorpore a su casco un balaclava con protección ignífuga y dieléctrica con certificación frente a arco eléctrico:



Imagen 15 Balaclava para arco eléctrico. Fuente: Buff.com

4.5. Punto Adjunto al PSS

Se propone a la dirección facultativa y dirección de obra el incluir al Plan de Seguridad y Salud de la planta fotovoltaica un texto explicativo del riesgo existente, como, por ejemplo:

Punto XX del PSS: Riesgo frente a ArcFlash.

El **arcflash** puede producirse durante tareas de mantenimiento, manipulación de cuadros de baja y media tensión, conexiones o desconexiones bajo carga, y en general, en cualquier intervención donde se interactúe con componentes eléctricos en tensión. El riesgo de arco se mantiene debido a la naturaleza del sistema eléctrico y la acumulación de energía en inversores, strings y cuadros de distribución de **toda la planta fotovoltaica.**

Conforme a la norma NFPA 70E, la simulación realizada previamente a la energización de la planta, el nivel de riesgo asociado a estas tareas se clasifica como **Categoría de Riesgo B**, lo que implica una **energía incidente moderada** (entre 1.2 y 12 cal/cm²). Para controlar este riesgo, se establecen las siguientes medidas de prevención y protección.

Medidas organizativas, protección colectiva:

- Planificación previa del trabajo a realizar, mostrando a los trabajadores las áreas afectadas mediante la digitalización de la planta.
- Formación específica del personal en procedimientos seguros, evaluación de riesgos eléctricos y uso correcto de EPI.
- Señalización de las zonas mediante etiqueta identificativa de arco eléctrico.

Equipos de protección individual con certificación para riesgo de arco eléctrico – Nivel B:

- Ropa de protección ignífuga certificada para arco eléctrico, con un ATPV acorde a la energía incidente estimada (mínimo 8 cal/cm²).
- Casco dieléctrico con pantalla facial y balaclava con protección contra arco.
- Guantes dieléctricos combinados con guantes de protección ignífuga en la cara interior y en la cara exterior de protección mecánica.
- Calzado de seguridad dieléctrico y antiestático.
- Protección auditiva.

Tras la implementación de estas medidas en el plan de seguridad y salud y su aprobación, es necesario que el coordinador de seguridad y salud, así como los trabajadores nombrados como recurso preventivo estén atentos al cumplimiento de estas medidas ya que su correcta aplicación contribuye de forma esencial a la reducción del riesgo eléctrico en los trabajos dentro de la planta.

4.5.1. Ficha de Formación e Información

En el Anexo I de este documento se incorpora una ficha informativa que deberá ser completada por todos los trabajadores. Esta ficha tiene como finalidad informar sobre el riesgo existente de Arc Flash existente en la instalación.

Asimismo, en dicho anexo se detallan las medidas de protección personal que deben adoptarse en todo momento para minimizar el riesgo de accidente. Estas medidas incluyen el uso obligatorio de equipos de protección individual (EPI) específicos, tales como ropa ignífuga, pantallas faciales, guantes dieléctricos, calzado aislante, entre otros elementos de seguridad.

Es de carácter obligatorio que cada trabajador lea detenidamente la información proporcionada, firme la ficha como constancia de su recepción y comprensión, y mantenga el cumplimiento estricto de las normas y recomendaciones establecidas.

5. Conclusiones y discusión

Como hemos podido observar tras simular el riesgo de arco eléctrico en una planta fotovoltaica real, se han detectado muchas zonas de riesgo en las que el fenómeno del arc flash puede llegar a producirse.

La realización de este estudio hace presente la falta de bibliografía (a nivel nacional) específica para la valoración de este riesgo, mostrando la notable falta de información y formación de los trabajadores ya no solo de plantas fotovoltaicas a nivel industrial, sino también hacia otros oficios del sector eléctrico en España.

Se prioriza en esta sección el empleo de las nuevas tecnologías como la digitalización para conocer de antemano donde se presentan los riesgos frente a arcflash y además poder cuantificarlo incorporando pegatinas fácilmente identificables en lugares en los que existe este riesgo, indicando los EPIS necesarios y el riesgo existente.

Cada vez más existe una conciencia por parte de los coordinadores de seguridad y salud sobre la necesidad de realizar el estudio de arcflash en cada lugar en el que este riesgo pueda llegar a producirse desencadenando un accidente laboral debido al aumento considerable de casos de accidente, pero es necesario que todos los coordinadores sepan sobre este riesgo y lo incluyan en el plan de prevención de riesgos laborales en fase de diseño de la obra.

Como hemos podido comprobar, existen EPIS con capacidad de soportar un arcflash, pero la mayoría de los EPIS que aún se comercializan son eficaces para trabajos con tensiones de distribución y arco eléctrico controlado (soldadura por arco), por tanto, es necesario más investigación en materiales que puedan resistir las altas temperaturas y esfuerzos mecánicos a los que se someten durante un arcflash. Además, con estos estudios los EPIS necesarios para que los trabajadores puedan enfrentar situaciones con riesgo de arcflash pueden llegar a ser más ligeros, proporcionando al trabajador más capacidad de movimiento, proporcionando una mejor ergonomía con totales garantías de seguridad.

A la hora de realizar trabajos en tensión en **cualquier estancia de la planta fotovoltaica**, aunque las tensiones presentes en esta planta no sean elevadas, debe incluirse en la evaluación de riesgos de cada subcontrata o contrata principal que ejecute los trabajos el estudio de los riesgos existentes frente a arcflash, además de en el plan de seguridad y salud de la obra.

Es por todo lo anterior la necesidad de colaboración todo el personal de la planta y empresas para que se lleven a cabo las medidas de seguridad establecidas, implicando al personal operativo en la necesidad de que se lleven en todo momento los EPIS necesarios según el riesgo existente para minimizar los riesgos a los que se exponen.

Firmado

José Antonio Rodríguez Jiménez

Ingeniero Eléctrico

6. Normativa aplicable y Bibliografía

6.1. Normativa aplicable.

La normativa española actual no recoge normativa propia acerca del estudio arco eléctrico, por lo que es necesario hacer uso de normativa internacional para el desarrollo de esta metodología de estudio. En España, únicamente debemos tener en cuenta los aspectos más relevantes acerca de riesgo eléctrico y de la prevención de riesgos laborales, por lo que a continuación, se presenta la normativa a tener en cuenta para el estudio y modelado de instalaciones frente a arco eléctrico.

Normativa internacional aplicable para el estudio de arco eléctrico:

- NFPA - 70E. (Última Edición 2018). Standard for Electrical Safety in the Workplace (National Fire Protection Association).
- IEEE 1584. (Última Edición 2018). IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- OSHA 29 CFR 1910.269. Electric power Generation, Transmission, and Distribution. (Occupational Safety and Health Administration).
- IEC 60909. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems (International Electrotechnical Commission).
- IEC 61482. Protective Clothing Against the Thermal Hazards of an Electric Arc (International Electrotechnical Commission).

Reglamentación española aplicable a los resultados de las anteriores, para el estudio de protecciones frente a arco eléctrico.

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de riesgos laborales (BOE nº 269, de 10 de noviembre de 1995).
- Real Decreto 614/2001 de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico (BOE nº 148, de 21 de junio de 2001).
- Real Decreto 39/1997 de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención (BOE nº 27, de 31 de enero de 1997).
- Real Decreto 773/1997 de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual (BOE nº 140, de 12 de junio de 1997).

- Nota técnica de prevención - NTP 904. Arco eléctrico: estimación de la energía calorífica incidente sobre un trabajador. (Formigó, M. P. (2011), Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo)
- Nota técnica de prevención - NTP 957. Arco eléctrico: caso práctico de estimación de la energía calorífica incidente sobre un trabajador. (Formigó, M. P. (2011), Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo)
- Real Decreto 486/1997 de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo (BOE nº 97, de 23 de abril de 1997).

6.2. Bibliografía

En este apartado se muestran las referencias bibliográficas empleadas para redactar este documento.

BOE-A-2001-11881 Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. (n.d.).

Retrieved May 6, 2025, from <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-11881>

Boletín Oficial del Estado. (1995). *Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.*

Cabello, J. R., Bullejos, D., & Rodríguez-Prieto, A. (2024). *Analysis of incident energy and arc flash boundary behavior in electric power distribution systems.* <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.Doi>

Campbell, R. B., & Dini, D. A. (2015). *Occupational Injuries From Electrical Shock and Arc Flash Events Final Report.* www.nfpa.org/Foundation

Formigó, M. P. (2011). *Nota técnica de prevención - NTP 904.*

Guantes aislantes de la electricidad. (n.d.).

IEEE SA - IEEE 1584-2018. (n.d.). Retrieved May 9, 2025, from <https://standards.ieee.org/ieee/1584/5802/>

Ministerio de Trabajo y Economía social. (2015). *ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES DE TRABAJO.* www.empleo.gob.es

Ministerio de Trabajo y Economía social. (2023). *ESTADÍSTICA DE ACCIDENTES DE TRABAJO*.

NFPA 70E: Norma Para La Seguridad Eléctrica En Lugares de Trabajo, Pub. L. No. NFPA® 70E®, Standard for Electrical Safety in the Workplace (2018). www.nfpa.org/docinfo

O'Connor, T. (2015, July). *The Dangers of Arc Flash: Know the risks and how to protect yourself*.

UNE-EN 50321-1:2018 *Trabajos en tensión. Calzado de protección...* (n.d.). Retrieved May 9, 2025, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-50321-1-2018-n0060184>

WALBURGA HEMETSBERGER, DRIES ACKE, & MICHAEL SCHMELA. (2022). *EU Market Outlook For Solar Power*.

ANEXO I: Ficha de Formación e Información

Ficha Informativa a Trabajadores Prevención de Riesgo Eléctrico frente a ArcFlash			
Empresa:			
CIF			
Trabajos a Realizar			
Trabajador		Tareas a Realizar	Marcar SI recurso preventivo
Nombre	Apellidos		
Formación del Trabajador			Marcar SI o NO
Riesgo Eléctrico según RD 614/2001			SI NO
Trabajos en Tensión por el Método de Contacto en Baja Tensión			SI NO
Trabajos en altura			SI NO
Básico PRL con duración de 60 horas, especialidad electricidad			SI NO
Primeros auxilios			SI NO
Registro de EPIS		Marcar SI o No	Caducidad
Ropa de Protección Ignífuga con ATPV, min 8 cal/m ²		SI NO	
Casco dieléctrico con pantalla facial y balaclava contra arco eléctrico		SI NO	
Guantes dieléctricos, mecánicos e ignífugos, adecuados al nivel de tensión presente		SI NO	
Calzado Dieléctrico y antiestático de seguridad		SI NO	
Protección auditiva		SI NO	
Nº	EL TRABAJADOR deberá cumplir en todo momento las siguientes medidas de prevención		
1	Revisar la planificación previa del trabajo, conocer las áreas afectadas mediante la digitalización de la planta y conocer el PSS.		
2	El TRABAJADOR tiene la formación necesaria en procedimientos seguros y evaluación de riesgos eléctricos para los trabajos a realizar.		
3	Usar correctamente los Equipos de Protección Individual (EPI) según formación recibida.		
4	Verificar que la zona de trabajo está señalizada correctamente.		
5	Vestir en todo momento ropa ignífuga certificada para arco eléctrico, con ATPV mínimo de 8 cal/cm ² .		
6	Utilizar casco dieléctrico con pantalla facial y balaclava con protección contra arco.		
7	Usar guantes dieléctricos combinados con guantes de protección ignífuga y mecánica.		
8	Calzar botas o calzado de seguridad dieléctrico y antiestático.		
<p>El arcflash puede producirse durante tareas de mantenimiento, manipulación de cuadros de baja y media tensión, conexiones o desconexiones bajo carga, y en general, en cualquier intervención donde se interactúe con componentes eléctricos en tensión. El riesgo de arco se mantiene debido a la naturaleza del sistema eléctrico y la acumulación de energía en inversores, strings y cuadros de distribución de toda la planta fotovoltaica. Conforme a la norma NFPA 70E, la simulación realizada previamente a la energización de la planta, el nivel de riesgo asociado a estas tareas se clasifica como Categoría de Riesgo B, lo que implica una energía incidente moderada (entre 1.2 y 12 cal/cm²). Para controlar este riesgo, se establecen las siguientes medidas de prevención y protección.</p>			
<p>EL TRABAJADOR abajo firmante declara que los datos proporcionados en esta ficha informativa son verídicos y que cuenta con todos los EPIS arriba mencionados en correcto estado de conservación, además de conocer todos los aspectos relacionados con su puesto de trabajo y los mencionados en esta ficha.</p>			
Firma y DNI del Resp. Empresa		Firma y DNI del Trabajador	Firma y DNI del CSS
DNI:		DNI:	DNI: