

Arco eléctrico: estimación de la energía calorífica incidente sobre un trabajador

Arc flash: Estimation of thermal incident energy on worker
Arc électrique: Estimation de l'énergie calorifique incidente sur travailleur

Redactor:

Marcos Pérez Formigó
Ingeniero de Telecomunicación

CENTRO NACIONAL DE MEDIOS
DE PROTECCIÓN

Desde que en 1982, Ralph H. Lee⁽¹⁾, introdujese en el ámbito prevencionista las primeras ecuaciones para cuantificar los riesgos térmicos asociados al arco eléctrico, el conocimiento teórico y las medidas de protección frente a dichos riesgos, se han desarrollado enormemente. Esta nota técnica quiere recoger los principales métodos existentes, para la estimación de la energía calorífica asociada al arco eléctrico, principal elemento para evaluar el riesgo térmico en dichos fenómenos.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Complementada por la NTP 957.

1. CONCEPTO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS FENÓMENOS ASOCIADOS

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.

El arco es un fenómeno caótico (es decir, no lineal y fuertemente dependiente de las condiciones iniciales), complejo (depende de muchos factores como el medio físico donde se produce, la intensidad de corriente o la forma y materiales de la instalación eléctrica en tensión) y que puede originarse, tanto por un fallo técnico como por un error humano (caída de herramientas, maniobra inadecuada, etc.). Los estudios técnicos, recomendaciones y guías de seguridad eléctrica actuales, establecen la necesidad de evaluar el riesgo asociado al arco eléctrico, en trabajos en o próximos a instalaciones, donde existan tensiones superiores a 250 V (tanto en alterna como en continua), bajo ciertas circunstancias⁽²⁾.

Cuando tiene lugar un arco eléctrico, se produce un flujo de cargas eléctricas y una gran liberación de energía y sustancias peligrosas, entre las que cabe destacar:

- *Energía térmica*, produce gran aumento de temperatura en las inmediaciones del arco.
- *Onda de presión*, que produce destrucciones mecánicas sobre las instalaciones y daños físicos sobre los trabajadores.
- *Gases tóxicos y metralla*, debida a las altas temperaturas que se alcanzan durante el arco.
- *Radiaciones electromagnéticas*, principalmente ultravioleta (UV) e infrarroja (IR).

Las principales guías y recomendaciones de seguridad eléctrica, relacionan los parámetros eléctricos de una instalación, con los valores de energía calorífica incidente sobre los trabajadores, es decir, se centran en los riesgos térmicos asociados al arco. No obstante, cada vez existen más estudios^(3,4,5), que cuantifican el resto de riesgos asociados al fenómeno de arco, como son los riesgos oculares o auditivos.

2. PRINCIPALES CÓDIGOS Y NORMAS

En el ámbito europeo, no existe ninguna norma técnica que recoja métodos para estimar el riesgo térmico al que se expone un trabajador cuando se produce un arco eléctrico. Actualmente, se está trabajando en la inclusión de dichos aspectos en la norma europea EN 50110⁽⁶⁾, sobre explotación de instalaciones eléctricas.

Existen dos normas norteamericanas, que se pueden citar como las principales herramientas para analizar y evaluar los riesgos térmicos asociados al arco eléctrico:

NFPA 70E-2009 Norma sobre seguridad eléctrica en los lugares de trabajo (Standard for Electrical Safety in the Workplace)

La NFPA (National Fire Protection Association) es un organismo americano, que se creó en 1896, y que se encarga de elaborar normas y recomendaciones para la prevención y la protección de los lugares de trabajo. Entre las normas que elabora se encuentra la norma NFPA 70E. El arco eléctrico, fue incluido por primera vez, como un riesgo eléctrico más a evaluar, en la quinta edición (1995). En su versión actual (octava edición, 2009), la evaluación y análisis del arco eléctrico, se detallan en el apartado 130.3 y anexo D. Este anexo establece métodos para calcular la energía calorífica incidente sobre los trabajadores expuestos a este fenómeno y ofrece recomendaciones para la selección y uso de equipos de protección individual (EPI) que deben portarse dentro de la "Zona de peligro frente al arco", que queda delimitada a partir del "Limite de protección frente al arco" (Flash Protection Boundary (FPB), en su terminología anglosajona). Fig. 1.

Esta norma resalta, que si tras tomar todas las medidas preventivas y de protección, el riesgo térmico residual dentro de la zona de trabajo, presenta un valor energético igual o superior a 40 cal/cm², no se recomienda la realización de trabajos en tensión, en dicha zona.

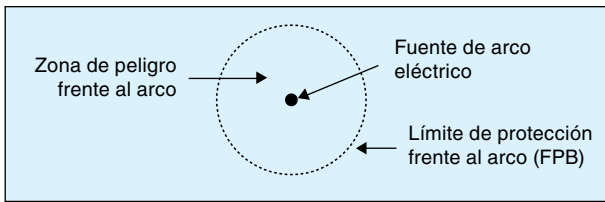


Figura 1.

IEEE 1584-2002 Guía para el cálculo de los riesgos derivados del arco eléctrico (Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations)

Esta norma elaborada por el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) proporciona métodos muy potentes para el cálculo de la energía calorífica incidente sobre los trabajadores. Tal es la importancia de dichos métodos, que también están recogidos en la propia norma NFPA 70E-2009. El uso de las ecuaciones recogidas en esta norma está más extendido que las que recoge la norma NFPA 70E, ya que aunque son más complejas (utilizan más variables de la instalación en estudio), su ámbito de aplicación es más amplio y sus resultados más precisos.

3. ESTIMACIÓN DEL RIESGO TÉRMICO ASOCIADO AL ARCO ELÉCTRICO

El apartado 130.3 de la NFPA 70E-2009 recomienda el procedimiento de la figura 2, para la estimación del riesgo térmico asociado a un arco eléctrico, al que puede verse expuesto un trabajador, en o en la proximidad de una instalación eléctrica en tensión.

Cálculo de la energía calorífica incidente sobre un trabajador

La energía calorífica incidente durante un fenómeno de arco eléctrico, se puede calcular siguiendo las dos etapas que se presentan en la figura 2.

1ª Etapa: Seleccionar un método de cálculo

Una vez identificadas las características de la instalación y del trabajo a realizar, se selecciona el método NFPA 70E o IEEE 1584, en base a sus ámbitos de aplicación (ver tabla 1).

Si dicha instalación o condiciones de trabajo, no se ajustan a ninguno de los ámbitos de aplicación de dichos métodos, o no se puede recopilar toda la información necesaria para aplicar los mismos, se puede utilizar un método genérico, basado en el estudio de Ralph H. Lee⁽¹⁾, para trabajos en o en la proximidad de aparataje eléctrica al aire libre.

2ª Etapa: Aplicar el método seleccionado

Seleccionado un método, en las tablas 2 a 4, se detallan las expresiones para el cálculo de la energía incidente, de cada uno de dichos métodos.

4. RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN FRENTE AL ARCO ELÉCTRICO

Cuando los niveles de energía calorífica incidente sobre el trabajador, se encuentren dentro del rango de 1,2 – 40 cal/cm², será necesario tomar medidas preventivas frente a los riesgos asociados al arco. Como se comentó anteriormente, para niveles de energía iguales o superiores a 40 cal/cm², no se recomienda realizar trabajos dentro de dicha zona y para niveles de energía inferiores a 1,2 cal/cm², no existe riesgo de quemaduras de segundo grado.

Considerando todos los parámetros que influyen en el cálculo de la energía calorífica incidente sobre un trabajador, se observa que se puede disminuir dicha energía actuando sobre alguno de los siguientes elementos:

- Disminuir la tensión de la instalación.
- Disminuir la corriente del arco eléctrico.
- Disminuir la duración del arco eléctrico.
- Aumentar la distancia al arco eléctrico.

Parámetros	NFPA 70E		IEEE 1584	MÉTODO GÉNÉRICO
	Aparataje eléctrica al aire o en caja	Líneas y cables eléctricos		
Tipo de Instalación ^(a)	Aparataje eléctrica al aire o en caja	Líneas y cables eléctricos	Aparataje eléctrica al aire o en caja. Líneas y cables eléctricos	Aparataje eléctrica al aire
Nivel de Tensión	208 – 600 V	1 – 800 kV	208 V – 15 kV	Cualquiera
Distancia de Trabajo	≥ 457 mm	Varios ^(c)	≥ 457 mm	Cualquiera
Rango de corrientes de cortocircuito ^(b)	16 – 50 kA	Cualquiera	0,7 – 106 kA	Cualquiera
Tiempo de exposición	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera

Nota:

- (a): Se considera aparataje eléctrica, a los aparatos de maniobra, protección, regulación y control, incluidos los accesorios de las canalizaciones eléctricas utilizadas en instalaciones de baja y alta tensión.
- (b): Se utiliza como corriente de cortocircuito, la corriente de falla franca (bolted fault, en inglés), cortocircuito que presenta una impedancia despreciable en la localización de la falla.
- (c): Para analizar las distancias de trabajo y distancia entre conductores que entran dentro del ámbito de aplicación de este método, se deben seguir las notas de las tablas D.8 (1) y D.8 (2) del Anexo D de la norma NFPA 70E-2009.

Tabla 1. Ámbito de aplicación de diferentes métodos de cálculo de la energía calorífica asociada a un arco eléctrico

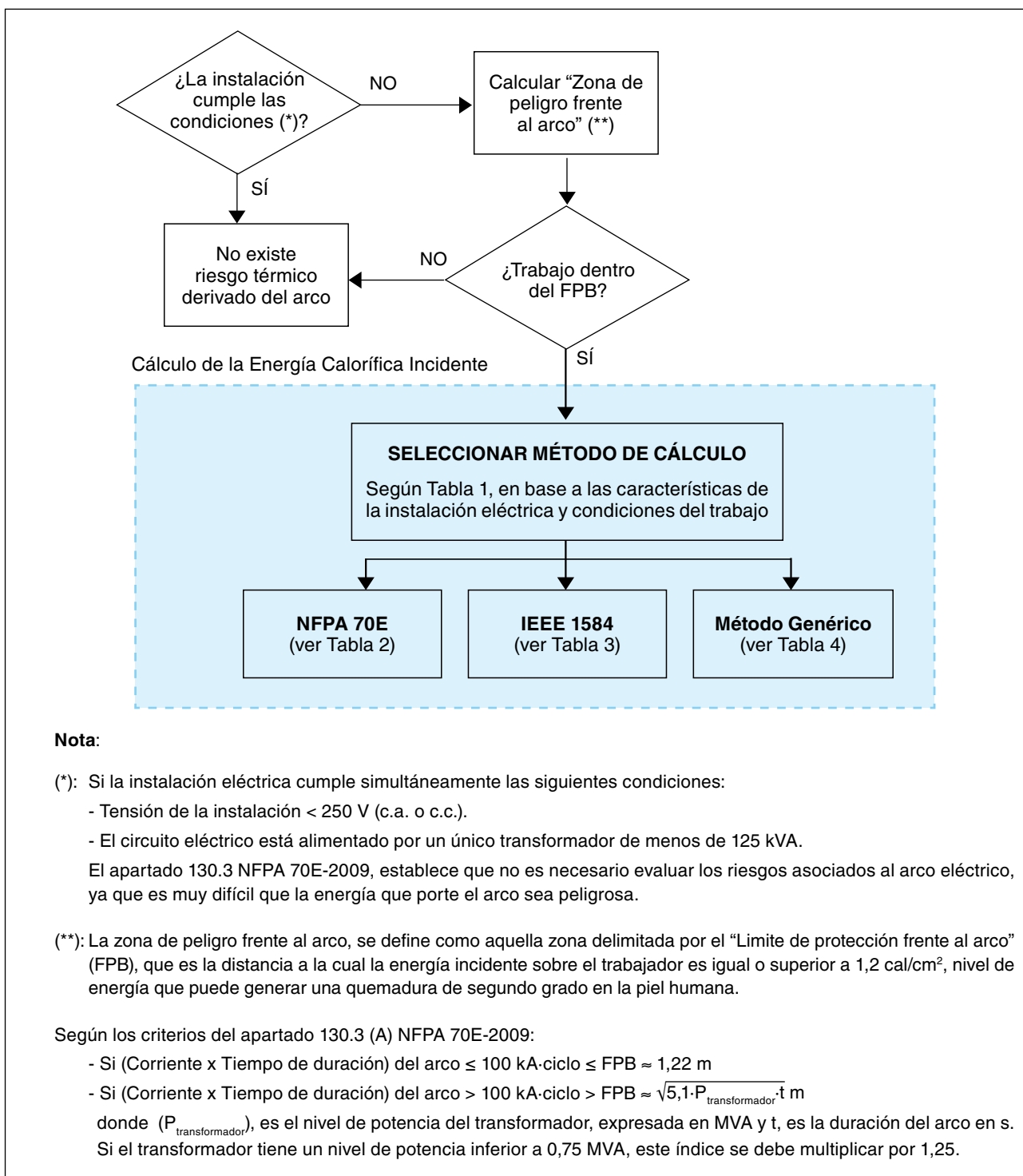


Figura 2. Procedimiento de estimación del riesgo térmico asociado al arco eléctrico

Excepto el primero de los parámetros (tensión de una instalación eléctrica), sobre el que es muy difícil actuar, existen dos categorías de medidas de prevención y de protección: las que intentan disminuir la energía del arco (actuando sobre la corriente o sobre la duración de éste) y las que intentan aumentar la distancia del trabajador a la fuente del arco.

Para la selección de dichas medidas frente a los riesgos asociados al arco eléctrico, se deben seguir los principios jerárquicos establecidos en el art. 15 de la LPRL⁽⁷⁾, debiendo primarse siempre las medidas en origen y de protección colectiva, frente a las individuales. En los fe-

nómenos de arco, es aún más importante seguir este proceso jerárquico, ya que existen muchos fenómenos asociados al arco, cuyo riesgo no se ha cuantificado, y sólo las medidas en origen, que eliminen la energía inicial del arco, pueden asegurar una adecuada protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a dichos fenómenos.

Medidas en origen y colectivas

Las medidas colectivas pueden estar orientadas a disminuir la energía del arco o a aumentar la distancia al mismo.

NFPA 70E	Arco libre	$E = 5271 \cdot D^{-1,9593} \cdot t \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]$
	Arco en Caja (Caja de 20") ⁽¹⁾	$E = 1038,7 \cdot D^{-1,4738} \cdot t \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]$
	Línea o cables eléctricos (1 – 800 kV)	$E = \emptyset \cdot t$

E, energía calorífica incidente (cal/cm²)
D, distancia de trabajo (pulgadas)
I_{bf}, corriente de falla (kA)
t, tiempo de duración del arco (s). Para las líneas y cables eléctricos, este tiempo, se deriva del tiempo de corte de los dispositivos de protección de la línea.
∅, flujo de calor radiado (cal/(cm²·s)). Este valor se obtiene a partir de las tablas D.8(1) y D.8(2), en base a la tensión de la línea, en kV y a la corriente de falla prevista, en kA.
⁽¹⁾, Cuando se tienen cuadros eléctricos y envoltentes de tamaño superior a 20 pulgadas, su valor se situará entre el valor estimado a partir de un arco libre y del arco en caja.

Tabla 2. Método NFPA 70E

IEEE 1584	$E = C_f \cdot E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$ $E_n = 10^{\log(E_n)}$ $\log(E_n) = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \log(I_a) + 0,0011 \cdot G$ $I_a = 10^{\log(I_a)}$	
	V < 1 kV	$\log(I_a) = K + 0,662 \cdot \log(I_{bf}) + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V \cdot (\log(I_{bf})) - 0,00304 \cdot G \cdot \log(I_{bf})$
	1 kV < V < 15 kV	$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \cdot \log(I_{bf})$

E, energía calorífica incidente (cal/cm²)
E_n, energía calorífica incidente normalizada (J/cm²)
G, distancia entre conductores (mm)
V, tensión nominal (kV)
I_{bf}, corriente de falla (kA)
D, distancia de trabajo (mm)
t, tiempo de duración del arco (s)
K, K₁, K₂, constantes dependientes de si es un sistema con tierra, sin tierra o con tierra de alta impedancia
K: -0,153 (aire libre); -0,097 (en caja)
K₁: -0,792 (aire libre); -0,555 (en caja)
K₂: 0 (para sistemas sin tierra y con tierra de alta impedancia); -0,113 (para sistemas con tierra)
C_f, factor de cálculo
1,0 para tensiones superiores a 1 kV
1,5 para tensiones inferiores a 1 kV
x, factor de distancia

Tensión (kV)	Tipo de aparamenta eléctrica	Distancia entre conductores (mm)	x, Factor de distancia
0,208 – 1	Aire libre	10 – 40	2,000
	Elementos de interrupción	32	1,473
	Cuadros generales y de control de motores (MCC)	25	1,641
	Cable	13	2,000
> 1 – 5	Aire libre	102	2,000
	Elementos de interrupción	13 – 102	0,973
	Cable	13	2,000
> 5 – 15	Aire libre	13 – 153	2,000
	Elementos de interrupción	153	0,973
	Cable	13	2,000

Tabla 3. Método IEEE 1584

Método genérico	$E = 5,12 \cdot 10^5 \cdot V \cdot I_{br} \left(\frac{t}{D^2} \right)$
<p>E, energía calorífica incidente (cal/cm²) V, tensión nominal (kV) I_{br}, corriente de falla (kA) D, distancia de trabajo (mm) t, tiempo de duración del arco (s)</p>	

Tabla 4. Método Genérico

Sistemas y medidas que disminuyen la energía del arco

- 1) Planificar la realización del trabajo sin tensión.
- 2) Ajustar las impedancias del sistema de tierra que afectará al trabajo.
- 3) Aumentar la impedancia del transformador de alimentación del circuito sobre el que se va a trabajar.
- 4) Ajustar la coordinación de los dispositivos de protección de la instalación sobre la que se va a trabajar.
- 5) Sustituir dispositivos de protección de alto rango por varios de inferior rango.

Sistemas y medidas que aumentan la distancia al arco

- 1) Realizar las maniobras de forma remota.
- 2) Situar los dispositivos de interrupción y control alejados de los elementos en tensión sobre los que actúan.

- 3) Utilizar aparamenta eléctrica que soporte los fenómenos y energías asociadas al arco.
- 4) Señalizar adecuadamente los lugares de trabajo, para indicar la entrada dentro de los límites de la zona de seguridad frente al arco (FPB) y asimismo, señalar y marcar la posible energía calorífica incidente en equipos sobre los que se suele realizar maniobras o realizar operaciones de mantenimiento en tensión.

Medidas de equipos de protección individual

Utilización de equipos de protección individual de protección térmica, que ofrezcan un nivel de protección adecuado a la energía calorífica incidente sobre el trabajador.

5. CONCLUSIONES

El arco eléctrico es uno de los principales riesgos a los que se ven expuestos los trabajadores de instalaciones eléctricas. Cuando se produce un arco, se desencadena una fuerte liberación de energía y se producen muchos fenómenos diferentes. Actualmente, el riesgo térmico asociado al arco, es el riesgo en el que más se ha avanzado y sobre el que se han planteado más medidas preventivas.

En la evaluación frente a los riesgos térmicos asociados al arco, es fundamental establecer dos elementos: la zona de peligro frente al arco, a través del "límite de seguridad frente al arco" (FPB) y una estimación de la energía calorífica incidente sobre los trabajadores dentro de dicha zona.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) R.H. LEE
The other electrical hazard: electric arc blast burns.
IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-18, No. 3, May/June 1982.
- (2) Apartado 130.3 de la norma NFPA 70E-2009 "Standard for Electrical Safety in the Workplace".
- (3) T.M. CRNKO
Flash hazard and design considerations for its reduction.
Industry Applications Conference. Fourtieth IAS Annual Meeting. Vol. 3, October 2005.
- (4) MARY CAPELLI-SHELLPFEFFER et al:
Correlation between electrical accident parameters and injury.
IEEE Industry Applications Magazine. March/April 1998.
- (5) T.E. NEAL Y R.F. PARRY:
Specialized ppe testing for electrical arc hazards beyond heat exposure.
Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 50 - 54, May 2004.
- (6) EN 50110-1:2004,
Operation of electrical installation.
- (7) Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales (LPRL).