

IV. METODOS DE CÁLCULO PARA ARCO ELECTRICO

NFPA 70E.

La primera organización en los Estados Unidos con relación a los estándares de fuego y seguridad eléctrica es la NFPA, Nacional Fire Protection Association. Su documento, NFPA 70E-2004, Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo, ha sido adoptada por la ANSI, American National Standard Institute como un estándar americano. Esta norma cubre las prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad, define a los trabajadores calificados y no calificados y provee una guía para establecer un programa de seguridad eléctrica. También contempla un análisis de riesgo eléctrico por choque y destello, discute los trabajos permitidos en equipo energizado y procedimientos de apertura/cierre apropiados. NFPA define y establece los límites de aproximación a equipo energizado contra choque y arco eléctrico e indica cómo seleccionar tanto el Equipo de Protección Personal (EPP) y equipo eléctrico de protección de los sistemas adecuados.

IEEE Std. 1584.

La IEEE 1584, Guía para realizar cálculos de riesgo por Arco Eléctrico, presenta métodos para el cálculo de la energía incidente durante un arco eléctrico y los límites de dicho arco en sistemas trifásicos de corriente alterna. Esta cubre el proceso de análisis desde la recopilación de los datos en campo hasta los resultados finales, presenta las ecuaciones necesarias para encontrar la energía incidente y los límites de protección por arco, y discute las soluciones alternativas por software. Las aplicaciones cubren un modelo derivado empíricamente y un modelo derivado teóricamente, aplicable para cualquier voltaje. Sistemas monofásicos de corriente alterna y sistemas de corriente directa no están incluidos en ésta guía.

Diferencia entre cálculos de NFPA 70E e IEEE Std. 1584.

El método de la NFPA 70E estima la energía incidente basado en un valor teórico máximo disipado por fallas por arco, basado en el trabajo de Ralph Lee. Este es generalmente conservador. En contraste, IEEE Std. 1584 estima la energía incidente con ecuaciones empíricas desarrolladas de análisis estadísticos de mediciones tomadas de numerosas pruebas de laboratorio. El método de IEEE intenta ser más realista que conservador, y pretende evitar accidentes debido a las limitaciones de la sobreprotección a los trabajadores. La sobreprotección también puede restringir la visibilidad y movimiento, incomodidad y reducción de la productividad del trabajador.

Límites de protección.

NFPA 70E define una serie de límites, mostrados en la figura 4.1 relacionados a la seguridad eléctrica cuando se trabaja en equipo energizado. Solo personal calificado puede cruzar estos límites y requieren utilizar Equipo de Protección Personal (EPP) apropiado dentro de estos límites.

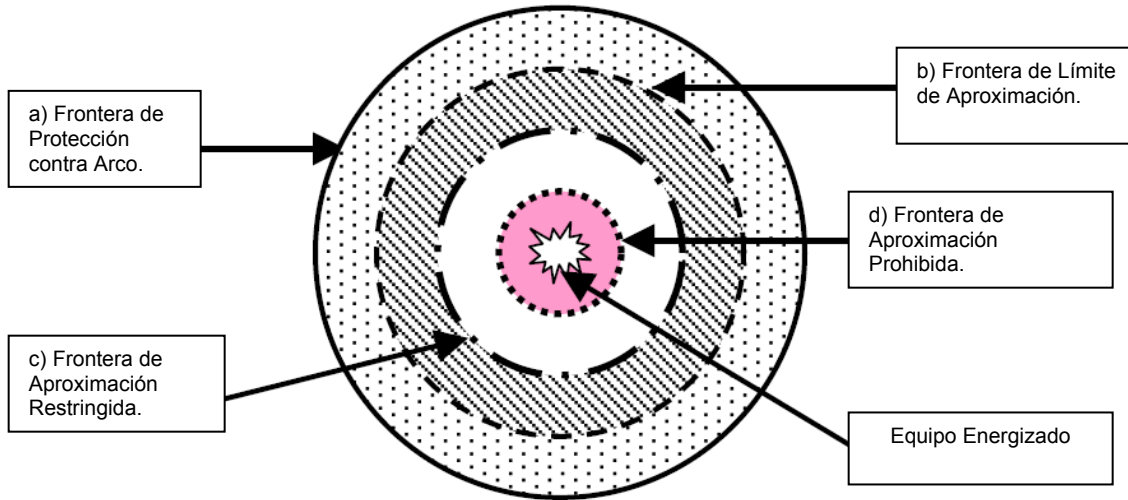


Figura 4.1. Límites de Protección.

a) *Frontera de protección contra arco.*

La frontera de protección contra arco es la distancia desde la fuente del arco (equipo expuesto energizado) a la cual la energía potencial de calor incidente de una falla por arco es de 1.2 cal/cm^2 sobre la superficie de la piel. Una exposición a 1.2 cal/cm^2 podría normalmente resultar en una quemadura curable de segundo grado.

Dentro de este límite los trabajadores requieren usar ropa de protección como camisas y pantalones resistentes al fuego (FR por sus siglas en inglés), y otro equipo para cubrir varias partes del cuerpo. La distancia puede variar de equipo a equipo ya que esto está en función de la corriente de falla disponible del sistema en este punto, el voltaje y las características de disparo del dispositivo de protección inmediato superior, así como de algunos otros parámetros.

b) *Frontera de límite de aproximación.*

Una frontera de protección contra choque que la puede cruzar únicamente personal calificado y que la pueden cruzar personas no calificadas a menos que lo hagan con una persona calificada.

c) *Frontera de aproximación restringida.*

Un límite de aproximación a una distancia de una parte viva expuesta dentro de la cual aumenta el riesgo de choque, debido a arco eléctrico ocasionado por movimientos involuntarios, para personal que trabaja cerca de una parte viva.

d) *Frontera de aproximación prohibida.*

Un límite de aproximación a una distancia de una parte viva expuesta dentro de la cual se considera lo mismo que estar haciendo contacto con la parte viva.

Equipo de Protección Personal.

La NFPA especifica el Equipo de Protección Personal (EPP) para trabajar dentro de la frontera de protección contra arco. Todas las partes del cuerpo que puedan estar expuestas al arco eléctrico, necesitan estar cubiertas por el equipo de protección personal apropiado. Todo Equipo de Protección Personal (EPP) debe comprender de ropa Retardante al Fuego (FR por sus siglas en inglés), casco o careta, lentes de seguridad, guantes, zapatos, etc. dependiendo de la magnitud de la energía del arco. La cantidad de Equipo de Protección Personal (EPP) requerida y clase que se necesita es determinada de los cálculos básicos de la energía incidente sobre el cuerpo de los trabajadores. Los cálculos necesitan ser realizados por una persona calificada, como un ingeniero. La ropa de protección limitaría la energía incidente a menos de 1.2 cal/cm² en el área de pecho/cara del trabajador. La ropa Retardante al Fuego (FR) provee aislamiento térmico y también es auto-extinguible. La ropa de protección es clasificada en cal/cm² o en J/cm².

Clasificación de la categoría peligro/riesgo.

NFPA 70E define 5 niveles de riesgo de arco eléctrico, Tabla 4.1, basados en el cálculo de la energía incidente a la distancia de trabajo.

Tabla 4.1. Clasificación del Equipo de protección Personal.

Categoría	Nivel de energía (cal/cm²)	Nivel de energía (J/cm²)	Ejemplos típicos de EPP
0	< 2	< 8.4	Algodón no tratado, lana, rayón.
1	5	21	Camisa y pantalón FR.
2	8	34	Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR.
3	25	105	Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR más overol FR.
4	40	168	Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR más vestido de arco multi-capas (3 o más).

Métodos de evaluación del riesgo.

Los cálculos de riesgo de arco eléctrico pueden ser realizados de distintas maneras. La elección del método puede basarse en la información disponible, cantidad de trabajo de cálculo, necesidad o precisión, disponibilidad de recursos y calidad del programa de mitigación del arco eléctrico. Sin importar qué método se utilice se debe estar consciente de las limitaciones del método y realizar el análisis de ingeniería para obtener mejores resultados.

1. Cálculos manuales: Se pueden realizar cálculos manuales utilizando las ecuaciones de la NFPA 70E o IEEE 1584 para pequeños sistemas radiales de distribución. Esto consume mucho tiempo y no es conveniente para grandes sistemas. Mientras más cálculos manuales se realicen, pueden ser introducidos errores inadvertidos en los cálculos.
2. Hoja de cálculo: El Standard IEEE 1584 viene con una hoja de cálculo en Excel que puede ser usada para evaluar los riesgos por arco eléctrico. Hojas de cálculo similares pueden ser fácilmente realizadas usando las ecuaciones de la NFPA 70E. Este método está limitado a sistemas radiales de una sola fuente y los errores se incrementan con el tamaño del sistema.
3. Programas integrados comerciales: Estos son prácticos para todos los sistemas con múltiples fuentes y múltiples escenarios de interconexiones donde se desea una mayor precisión y en donde los sistemas han tenido cambios a través del tiempo. Una vez que los datos son introducidos al programa, obtener la evaluación de los riesgos toma muy poco tiempo. Los resultados son observados instantáneamente.

Método de cálculo basado en IEEE Std. 1584.

Procedimiento del estudio de Arco Eléctrico.

Como se mencionó anteriormente las ecuaciones para el cálculo de arco eléctrico fueron desarrolladas en base a una serie de pruebas.

Las ecuaciones empíricamente derivadas fueron desarrolladas por un grupo de trabajo en arco eléctrico de la IEEE. Estas ecuaciones están basadas en resultados de pruebas y son aplicables para las condiciones mostradas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Condiciones para las cuales las ecuaciones de IEEE 1584 son aplicables.

Parámetro	Rango aplicable
Voltaje del sistema (kV)	0.208 a 15 kV
Frecuencia (Hz)	50 o 60 Hz
Corriente de Corto Circuito (kA)	0.7 a 106 kA
Separación entre electrodos (mm)	13 a 152 mm
Tipo de equipo	Aire libre, caja, CCM, panel, tableros, cables
Tipo de conexión a tierra	No aterrizado, aterrizado, aterrizado con una gran resistencia.
Fases	Fallas trifásicas

El procedimiento general del estudio de Arco Eléctrico recomendado en el estándar IEEE 1584 consta de los siguientes pasos:

1. Recopilar los datos de campo suficientes para realizar un estudio de corto circuito y coordinación.

Se debe contar con los diagramas unifilares actualizados, si no se cuenta con estos se debe hacer un levantamiento de datos para crearlos. Los diagramas unifilares deben contar con los datos suficientes para poder llevar a cabo los estudios de Corto Circuito, Coordinación de Protecciones y Arco Eléctrico.

Los diagramas deben mostrar todos los transformadores, líneas de transmisión, circuitos de distribución, puesta a tierra de los equipos, reactores limitadores de corriente y otros dispositivos limitadores de corriente, bancos de capacitores, cuchillas desconectadoras, tableros de distribución y centros de control de motores incluyendo dispositivos de protección y sus capacidades, alimentadores y circuitos derivados, así como motores hasta un nivel de 480V, y transformadores de instrumentos. El equipo debajo de los 240V

no necesita ser considerado a menos que involucre un transformador de 125kVA o un transformador de muy baja impedancia.

2. Identificar los posibles modos de operación del sistema.

En un sistema de distribución radial simple hay solo un modo de operación –normal- pero en un sistema más complejo puede haber diferentes modos.

Es importante determinar la corriente de falla en cada bus para los diferentes modos de operación, tanto la corriente máxima como la corriente mínima de falla.

3. Calcular la corriente de falla en cada punto del sistema.

Para esto es necesario desarrollar un estudio de Corto Circuito y obtener las corrientes de falla para cada bus del sistema.

En el siguiente capítulo se describe el procedimiento para el cálculo de la corriente de corto circuito.

4. Calcular la corriente de falla por arco que fluye a través de cada rama de cada punto de falla.

Esta se calcula para separar la corriente de falla por arco en el punto de interés de la porción de la corriente fluyendo a través del dispositivo inmediato superior de protección arriba de la falla.

La corriente de falla por arco será menor que la corriente de falla franca debido a la impedancia del arco, especialmente en aplicaciones menores a 1000V. Para aplicaciones en media tensión la corriente de arco también es una pequeña parte de la corriente de falla franca, y también debe ser calculada. A continuación se presenta la ecuación para el cálculo de la corriente de arco.

Para sistemas de baja tensión (<1 kV), la corriente de arco está dada por la siguiente ecuación (4.1).

$$I_a = 10^{\left\{ k + 0.662 \log(I_{bf}) + 0.0966V + 0.000526G + 0.588V \log(I_{bf}) - 0.00304G \log(I_{bf}) \right\}}$$

Ecuación 4.1

donde:

- I_a = corriente de arco (kA).
- k = -0.153; configuración abierta.
= -0.097 ; configuración caja
- I_{bf} = corriente de falla de corto circuito sólido trifásica (simétrica RMS kA)
- V = Voltaje del sistema (kV)
- G = separación entre conductores (mm).

Para sistemas de tensión media (>1 kV), la corriente de arco está dada por la ecuación (4.2).

$$I_a = 10^{\left\{ 0.00402 + 0.983 \log(I_{bf}) \right\}}$$

Ecuación 4.2

La ecuación para alta tensión no hace distinción entre la configuración abierta o de caja.

- Determinar el tiempo requerido para liberar la corriente de falla por arco utilizando los ajustes de los dispositivos de protección y asociándolos con las curvas de disparo.

Para poder obtener estos tiempos de operación es necesario desarrollar un estudio de coordinación de protecciones.

- Documentar los Voltajes del Sistema y la clasificación de los equipos.

Para cada bus, se debe documentar el Voltaje y la clase de equipo. Esto permitirá la correcta aplicación de las ecuaciones basadas en estándares de clase de equipo y la separación bus-bus como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Clase de Equipo y Separación entre partes vivas.

Clase de Equipo	Distancias entre Buses Típicas (mm)
Tablero 15 kV	152
Tablero 5 kV	104
Tablero Baja Tensión	32
CCM y Tableros de Baja Tensión	25
Cable	25
Otros	13

- Seleccionar las distancias de trabajo basadas en el voltaje del sistema y tipo de equipo.

La protección contra el arco eléctrico está basada en el nivel de energía incidente en la cara y el cuerpo de la persona a la distancia de trabajo, no en la energía incidente sobre manos o brazos.

Las distancias típicas de trabajo se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Clase de Equipo y Distancias de trabajo típicas.

Clase de Equipo	Distancias de Trabajo Típicas * (mm)
Tablero 15 kV	910
Tablero 5 kV	910
Tablero Baja Tensión	610
CCM y Tablero de Baja Tensión	455
Cable	455
Otros	Determinar en campo

* La distancia típica de trabajo es la suma de la distancia entre el trabajador parado frente al equipo, y del frente del equipo a la potencial fuente del arco dentro del equipo.

8. Calcular la energía incidente para cada punto de falla.

La energía incidente normalizada es utilizada para obtener la energía incidente a una superficie normal a una distancia y tiempo de arco dados con la ecuación (4.3).

$$E_n = 10^{\left\{ k_1 + k_2 + 1.081 \log(I_a) + 0.0011G \right\}}$$

Ecuación 4.3

donde:

E_n = Energía incidente normalizada en tiempo y distancia (J/cm²).

K_1 = -0.792 para configuraciones abiertas.

-0.555 para configuraciones de caja.

K_2 = 0 para neutros flotantes o aterrizados a través de resistencia

G = Separación entre conductores,

Finalmente se tiene que la energía incidente es:

$$E = 4.184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{610}{D} \right)^x$$

Ecuación 4.4

donde:

- E = Energía incidente (J/cm^2)
 C_f = Factor de cálculo = 1.0; voltaje > 1 kV.
 = 1.5; voltaje < 1 kV.
 t = Duración del arco (segundos)
 D = Distancia a la fuente de arco (mm).
 X = Exponente de distancia como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Factor de distancia (x) para varios voltajes.

Tipo	0.208 a 1 kV	> 1 a 15 kV.
Aire libre	2	2
Tablero	1.473	0.973
CCM y Panel	1.641	
Cable	2	2

9. Calcular la frontera de protección contra arco para cada punto de falla.

La frontera de protección contra arco es la distancia a la cual una persona sin equipo de protección personal (EPP) puede recibir una quemadura de segundo grado.

$$D_B = 610 \cdot \left[4.184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{1}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

Ecuación 4.5

donde:

- D_B = Distancia de la frontera al punto de arco (mm)
 C_f = Factor de cálculo = 1.0; voltaje > 1 kV.
 = 1.5; voltaje < 1 kV.
 E_n = Energía incidente normalizada.
 E_B = Energía incidente a la distancia de la frontera (J/cm^2); E_B puede ser establecida a $5 J/cm^2$ ($1.2 cal/cm^2$) para piel descubierta.
 t = Duración del arco (segundos)
 X = Exponente de distancia como se muestra en la tabla 3.3.

Método de cálculo basado en NFPA 70E. Anexo D

El método más simple para determinar el equipo de protección personal es usar las tablas del NFPA 70-E. Estas tablas dan respuestas inmediatas y no requieren levantamiento en campo. Se debe notar que estas tablas se aplican para corrientes de falla y tiempos de liberación de falla muy específicos y estas tablas no cubren todas las aplicaciones o instalaciones de equipo eléctrico. Aunque estas tablas intentan ser conservadoras para la mayoría de las aplicaciones, no pueden ayudar al usuario a seleccionar la protección adecuada, ya que se puede llegar a sobredimensionar el equipo.

Ralph Lee desarrolló un modelo para el cálculo del arco eléctrico. Este modelo sirvió por muchos años como el único método disponible. Su gran limitación es que no incluye un método para calcular la corriente de arco, la cual es muy importante en casos de sistemas de menos de 1000V. Este método se describe a continuación y es utilizado en software para aplicaciones en las que el modelo empírico no es conveniente, como puede ser en subestaciones al aire libre, sistemas de transmisión y distribución al aire libre.

1. Cálculo de la energía incidente para cada punto de falla utilizando NFPA 70-E.

Arco abierto al aire libre – 0.6 kV o menor, 16 – 50 kA corriente de CC.

$$E = 5271 \cdot D^{-1.9593} \cdot t \cdot [0.0016 \cdot I_{bf}^2 - 0.0076 \cdot I_{bf} + 0.8938]$$

Ecuación 4.6

Arco en caja - 0.6 kV o menor, 16 – 50 kA corriente de CC.

$$E = 1038.7 \cdot D^{-1.4738} \cdot t \cdot [0.0093 \cdot I_{bf}^2 - 0.3453 \cdot I_{bf} + 5.9675]$$

Ecuación 4.7

Arco abierto al aire libre – Superior a 0.6 kV.

$$E = 793 D^{-2} \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t$$

Ecuación 4.8

donde

- E = Energía incidente (cal/cm^2)
- I_{bf} = Corriente de falla de corto circuito sólido (kA)
- t = Duración del arco (segundos)
- D = Distancia a la fuente de arco (pulgadas)

2. Cálculo de la Frontera de protección contra arco utilizando NFPA 70-E.

La potencia máxima teórica en MW es la mitad de MVA de corto circuito trifásico. Esto ocurre cuando la corriente de arco es 70.7% de la corriente de corto circuito. Basada en esto, la frontera de protección contra arco es calculado como sigue:

$$D_B = \sqrt{2.65 \cdot 1.732 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t}$$

Ecuación 4.9

donde:

- D_B = Distancia de la frontera al punto de arco (pulgadas)
- V = Voltaje del sistema L-L (kV)
- I_{bf} = Corriente de falla de corto circuito sólido (kA)
- t = Duración del arco (segundos)