



Estudios de Arco Eléctrico en Parques Solares

Soluciones de Ingeniería

Facilitador:

IE Juan Pablo Hernández Valencia, Esp.

Contacto:

direcciondeproyectos@soluproyel.com

WSP (+57) 324 442 8539



Contenido

- 01 **Definiciones**
- 02 **Regulación**
- 03 **Estudios de arco eléctrico**
- 04 **Etiqueta**
- 05 **EPP y equipos**

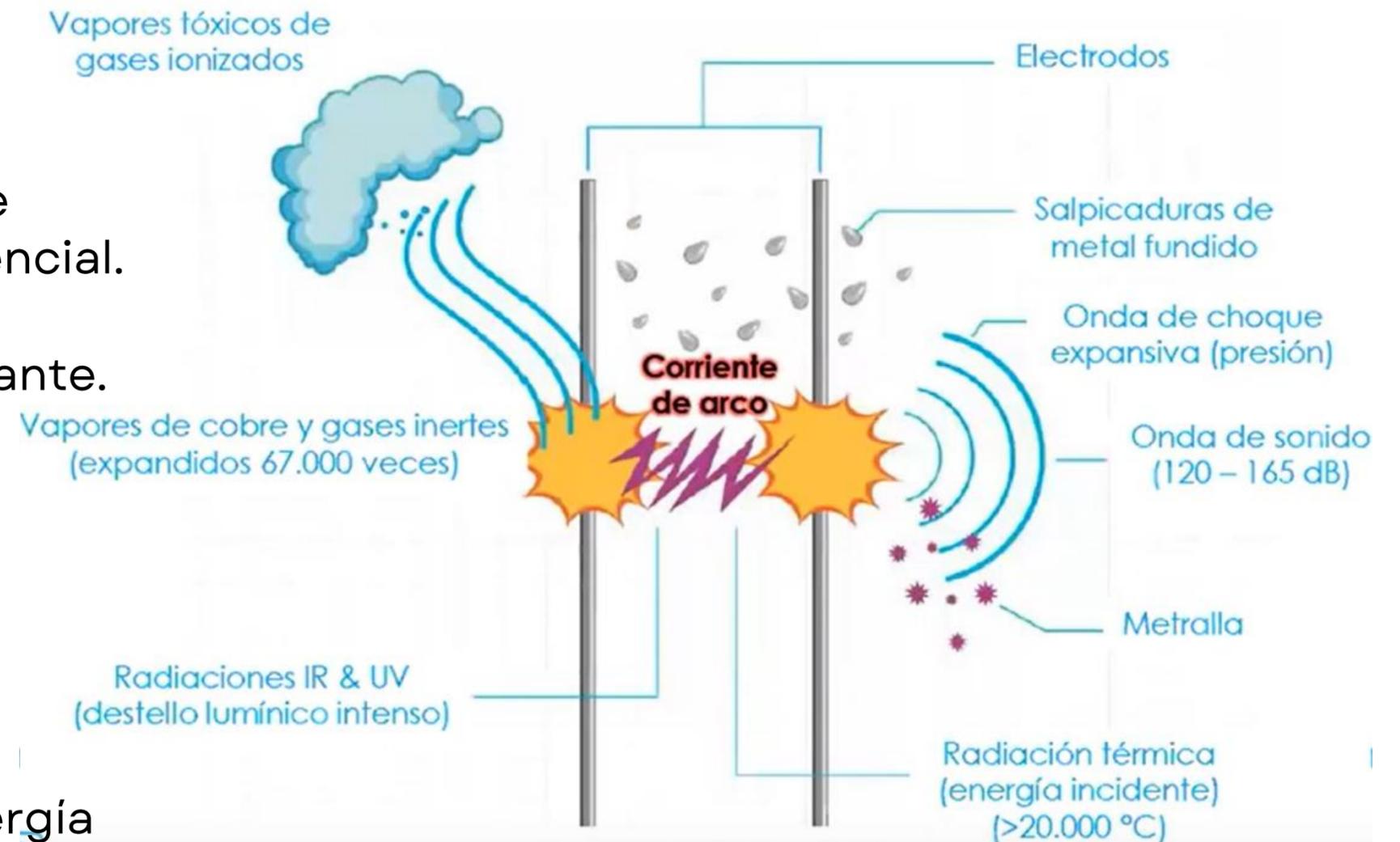
Agenda

Arco eléctrico

- Descarga disruptiva entre electrodos que presenten una diferencia de potencial.
- Si se presenta una rigidez dieléctrica pobre debida a la elevación del gradiente de potencial.
- Haz luminoso por flujo corriente medio aislante.

Energía incidente

- Se genera un relámpago (arc flash).
- Se genera una ráfaga de arco (arc blast).
- Lo anterior libera una gran cantidad de energía térmica sobre una superficie a una cierta distancia.
- Unidad de medida [=] cal/cm².
- Es la unidad utilizada para clasificar el nivel de riesgo y seleccionar los EPP adecuados.



Fuente: inelinc



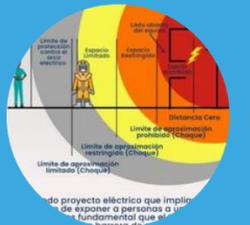
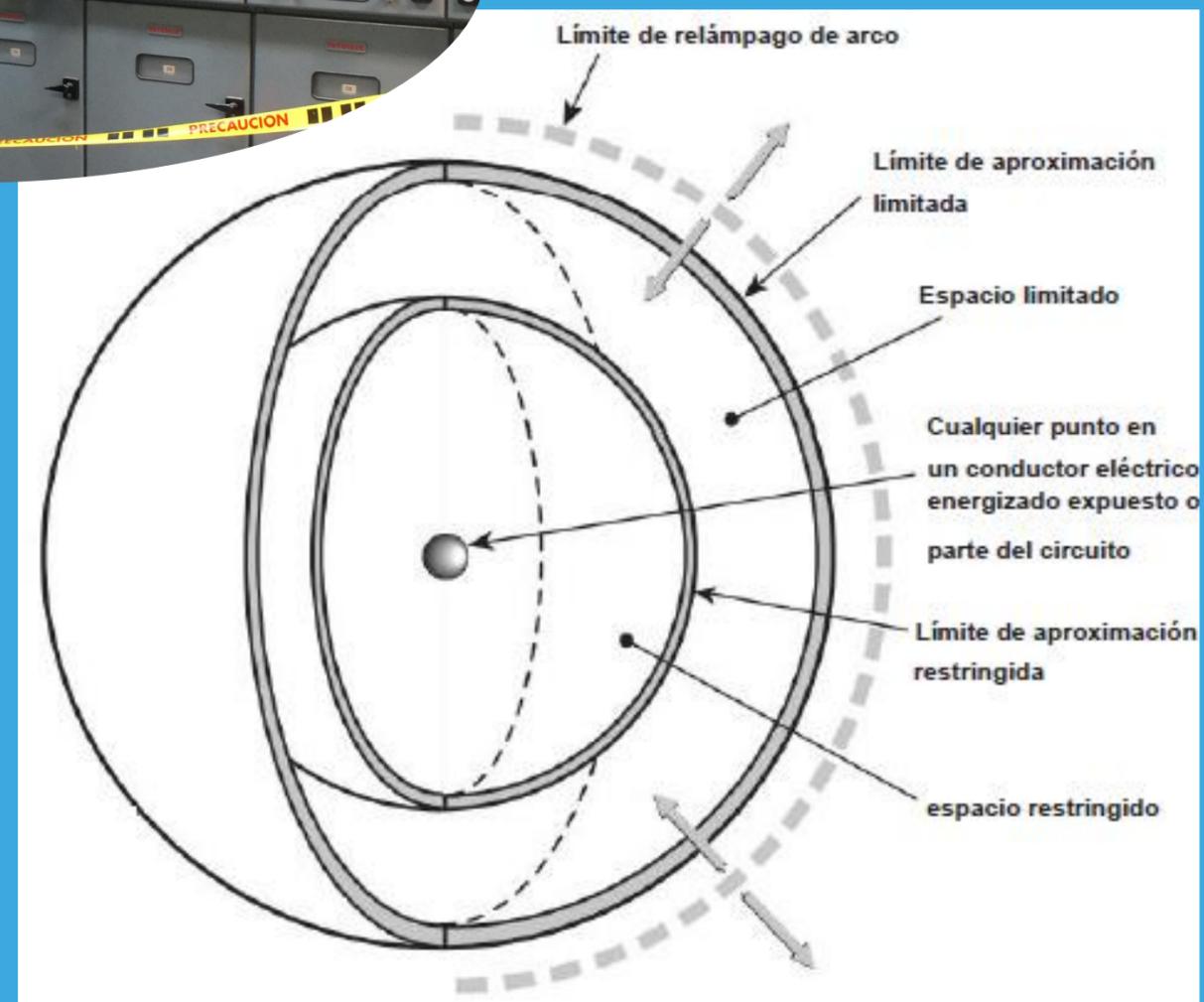
Frontera de arc flash

Límite de aproximación desde la fuente potencial de arco, donde la energía incidente = 1,2 cal/cm²



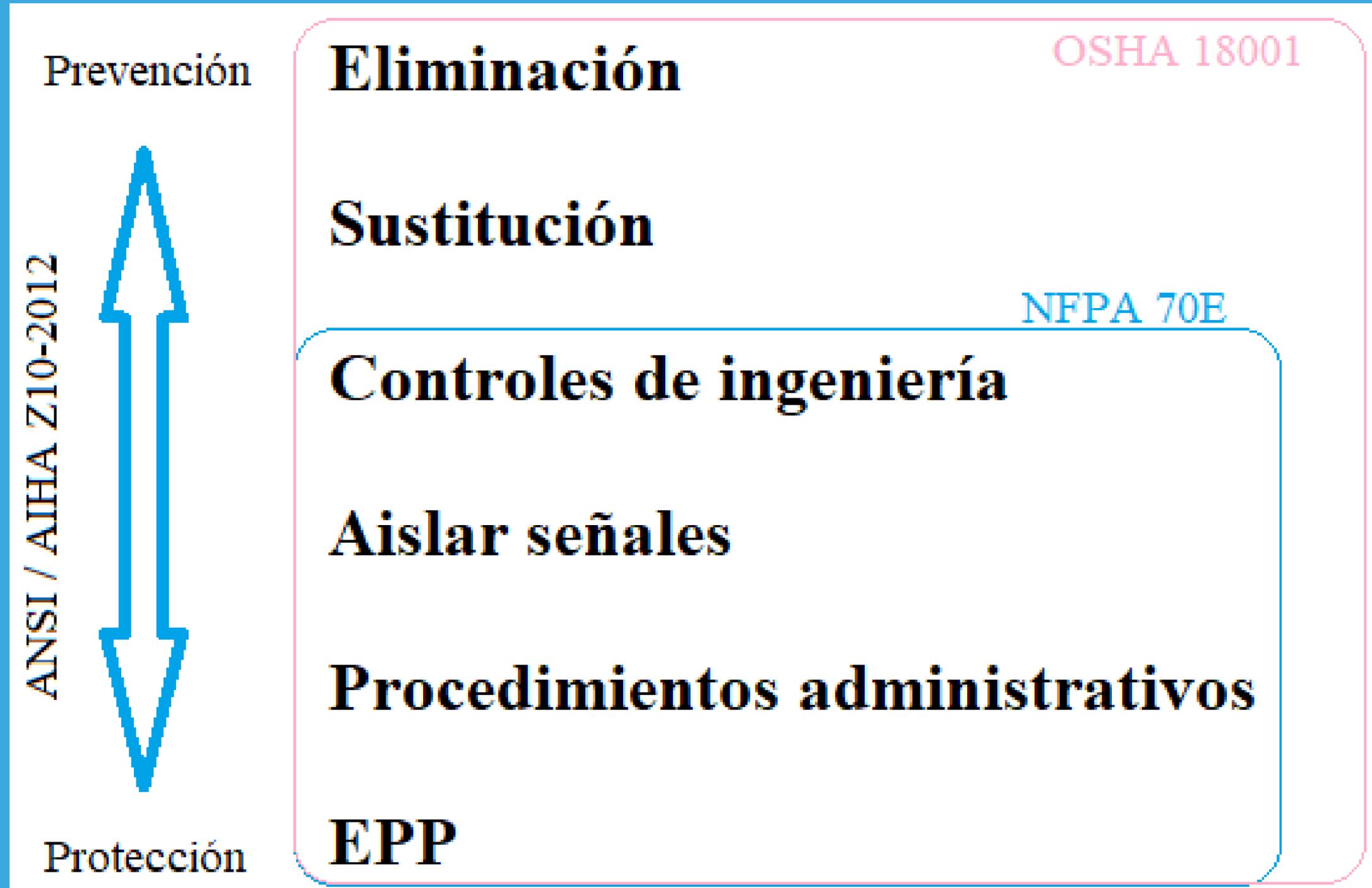
Puede ser mayor o menor que las dos fronteras de aproximación contra choque eléctrico

Quemadura de segundo grado en una piel desprotegida se expone a 1,2 cal/cm² (1 s)



Seguridad eléctrica

Medidas de control de peligros



Definiciones

Regulación

Estudios

Etiqueta

EPP y equipos

IEEE 1584 - 2018

Método Ralph Lee

AC

D.4

D.2

Etiquetas

Anexo D

130.5 H

D.3

Método Doughty Neal

Año 2021

NFPA 70E

Anexo J

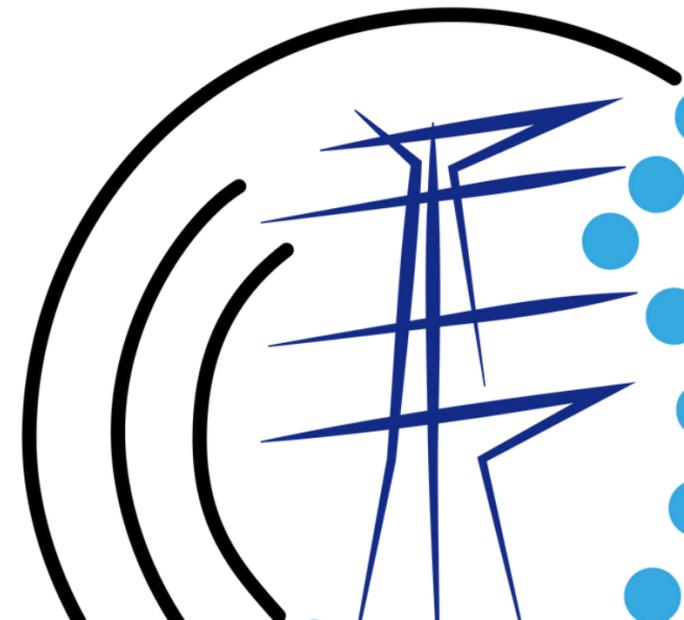
Permisos de trabajo

Anexo D

DC

D.5

Máxima potencia



Requisito en Colombia

RETIE - Res. 40117 Abr. 2/2024, Art. 3.10.5

- Se debe realizar un análisis de riesgos: el nivel de tensión, potencia de cortocircuito y el tiempo de despeje de la falla.
- En tableros y celdas donde la energía incidente sea igual o superior a 1,2 cal/cm², se debe fijar un aviso que indique la frontera de arco eléctrico, los datos sobre este riesgo y la leyenda “riesgo de arco eléctrico”.
- El límite de aproximación restringida debe ser señalado ya sea con una franja visible hecha con pintura reflectiva color amarillo u otra señal que brinde cerramiento temporal.

Evaluación del riesgo de arco eléctrico

- Obtener un valor de energía incidente para las condiciones de trabajo y equipo que represente riesgo.
- Identificar la frontera de arco eléctrico que obliga al uso de EPP ignífugos.
- Realizar señalización (etiquetas).
- Dimensionar los EPP adecuados.
- Reducir el riesgo en la fuente: capacidad equipos para resistir corto, ajustes y equipos arco resistentes.

Definiciones

Regulación

Estudios

Etiqueta

EPP y equipos

¿Por qué se debe hacer el estudio?

**Para prevenir
accidentes fatales y
garantizar entornos
seguros de trabajo**

**En Colombia es un
requisito técnico y a
la vez de obligatorio
cumplimiento Art.
3.10.5 RETIE vigente**

**Permite verificar la
coordinación de
protecciones desde
la seguridad en
riesgo eléctrico**

**Diagnostica los
equipos desde el
punto de vista
constructivo**

**Su implementación
mejora la
disponibilidad y
confiabilidad del
sistema**

Desarrollo del análisis de arco eléctrico

En 1980 se dicta la norma IEC 60364-4-42

- Hacía recomendaciones para prevenir el riesgo térmico en sistemas eléctricos de baja tensión.

En 1982 el Dr. Ralph Lee

- Presentó un escrito a la IEEE del riesgo de arc flash.

En el 2000 NFPA 70E

- Recomendó el cálculo de arc flash, según la metodología de Lee.

En el 2002 IEEE 1584

- Publicó un método de cálculo y adopta la metodología de Ralph Lee como el Método Lee.

The other electrical hazard:
electric arc blast burns

Godfather of the arc flash



**BSEE degree U.
of Alberta**

¿Cómo es el Método Lee?

Es un método teórico - genérico, basado en cálculos sencillos, su aplicación es para todo nivel de tensión y corto circuito, por lo tanto, llena los vacíos que las demás metodologías no pueden calcular.

$$E = 2.142 * 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (1)$$

Donde:

E: es la energía incidente (J/cm²)

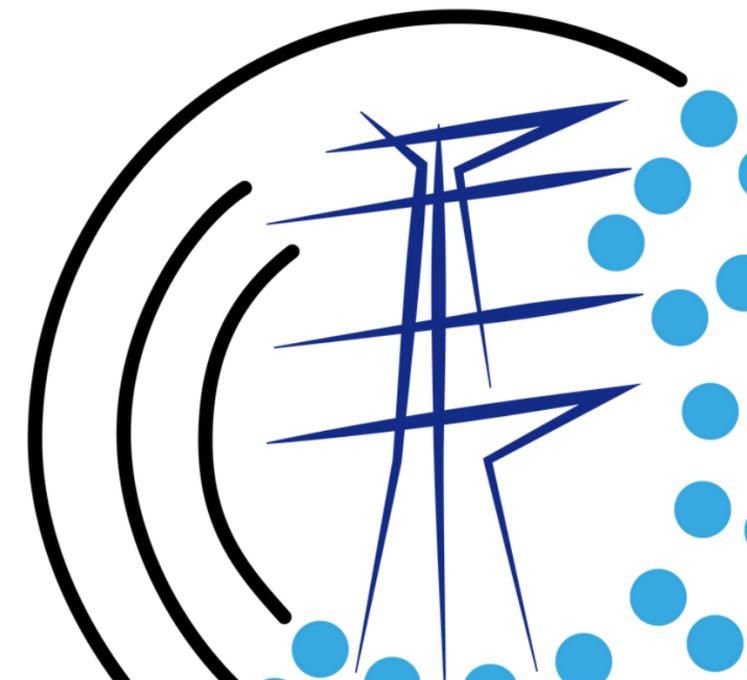
V: es el voltaje del sistema (kV)

t: es el tiempo del arco (segundos)

D: es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)

I_{bf}: es la corriente de falla (A)

Tomado de la IEEE 1584 p. 12



¿Cómo es el método de la NFPA 70E?

Espacios abiertos

$$E_{MA} = 5271 D_A^{-1.9593} t_A \begin{bmatrix} 0.0016 F^2 \\ -0.0076 F \\ +0.8938 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

EMA: maximum open arc incident energy (cal/cm²)

DA: distance from arc electrodes (in), for distances 18 in and greater

tA: es el tiempo del arco (segundos)

F: es la corriente de falla (kA), para el rango de 16 kA a 50 kA

Tomado de la NFPA 70E

Espacios cerrados

$$E_{MB} = 1038.7 D_B^{-1.4738} t_A \begin{bmatrix} 0.0093 F^2 \\ -0.3453 F \\ +5.9675 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

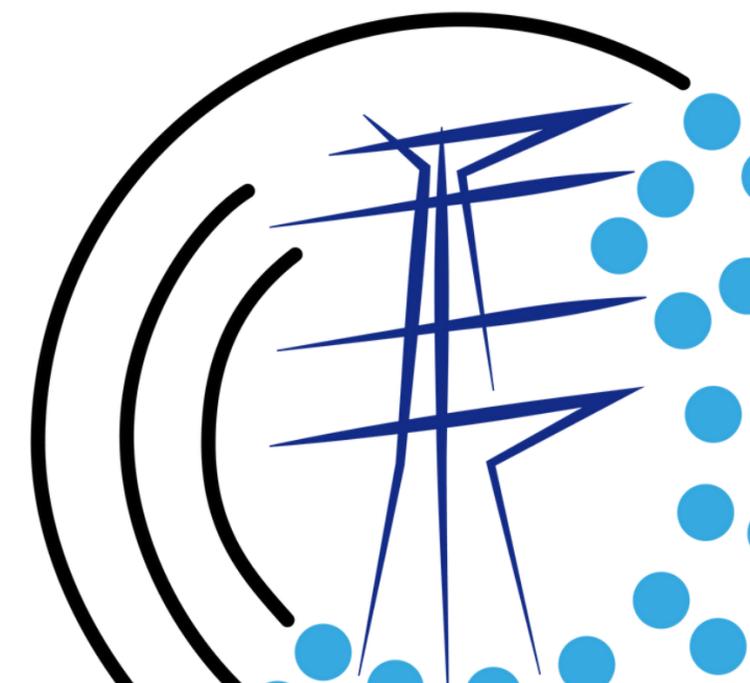
EMB: maximum 20 in. cubic box incident energy (cal/cm²)

DB: distance from arc electrodes (in), for distances 18 in and greater

tA: es el tiempo del arco (segundos)

F: es la corriente de falla (kA), para el rango de 16 kA a 50 kA

Tomado de la NFPA 70E



¿Cómo es el modelo de la IEEE 1584?

Los resultados están basados en **pruebas experimentales.**

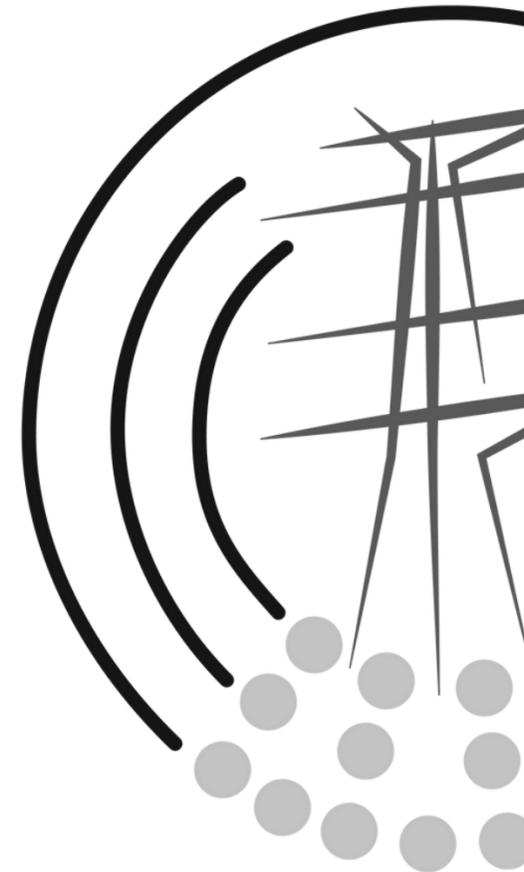
Se tiene en cuenta en el análisis, el tipo de instalación:

- Espacios abiertos.
- Cables.
- Celdas de MT.
- Centros de control de motores.
- Tableros de distribución.

También diferencia los voltajes:

- 208 a 1000 V.
- 1000 a 5000 V.
- 5000 a 15000 V.
- > 15 kV.

En todos los casos también diferencia si el sistema es aterrizado o no aterrizado.



¿Cómo es el modelo de la IEEE 1584?

$$I_g I_a = K + 0.662 I_g I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (I_g I_{bf}) - 0.00304 G (I_g I_{bf}) \quad (4) \quad V < 1 \text{ kV}$$

$$I_g I_a = 0.00402 + 0.983 I_g I_{bf} \quad (5) \quad V \geq 1 \text{ kV}$$

$$I_g E_n = K_1 + K_2 + 1.081 I_g I_a + 0.0011 G \quad (6)$$

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (7)$$

Donde:

Ig: es el log10

Ia: es la corriente de arco (kA)

K: es -0.153 para configuraciones abiertas y -0.097 para configuraciones cerradas

Ibf: es la corriente de falla para fallas trifásicas (simétricas RMS) (kA)

V: es el voltaje del sistema (kV)

G: es el espacio entre conductores, (mm)

En: es la energía incidente (J/cm²) normalizada para tiempo y distancia

K1: es -0.792 para configuraciones abiertas (sin gabinete) y -0.555 para configuraciones cerradas (equipo cerrado)

K2: es 0 para sistemas sin conexión a tierra y de alta resistencia y -0.113 para sistemas conectados a tierra

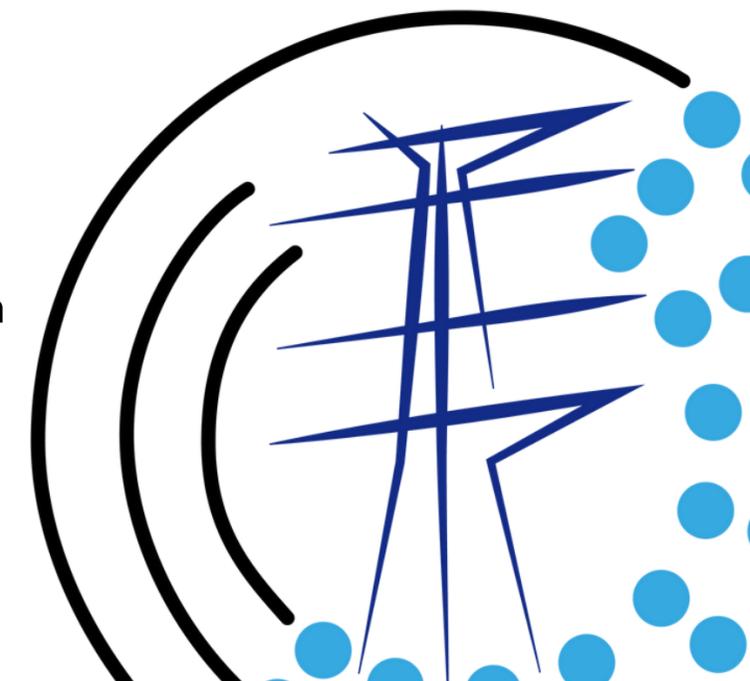
E: es la energía incidente (J/cm²)

Cf: es un factor de cálculo, 1.0 para voltajes superiores a 1kV y 1.5 para voltajes de o inferior a 1kV

t: es el tiempo del arco (segundos)

D: es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)

x: es el exponente de distancia de la Tabla 1



¿Cómo es el modelo de la IEEE 1584?

$$E = 2.142 * 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right)$$

(8) $V > 15 \text{ kV}$

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

(9)

Donde:

I_{bf} : es la corriente de falla

V : es el voltaje del sistema (kV)

E_n : es la energía incidente (J/cm²) normalizada para tiempo y distancia

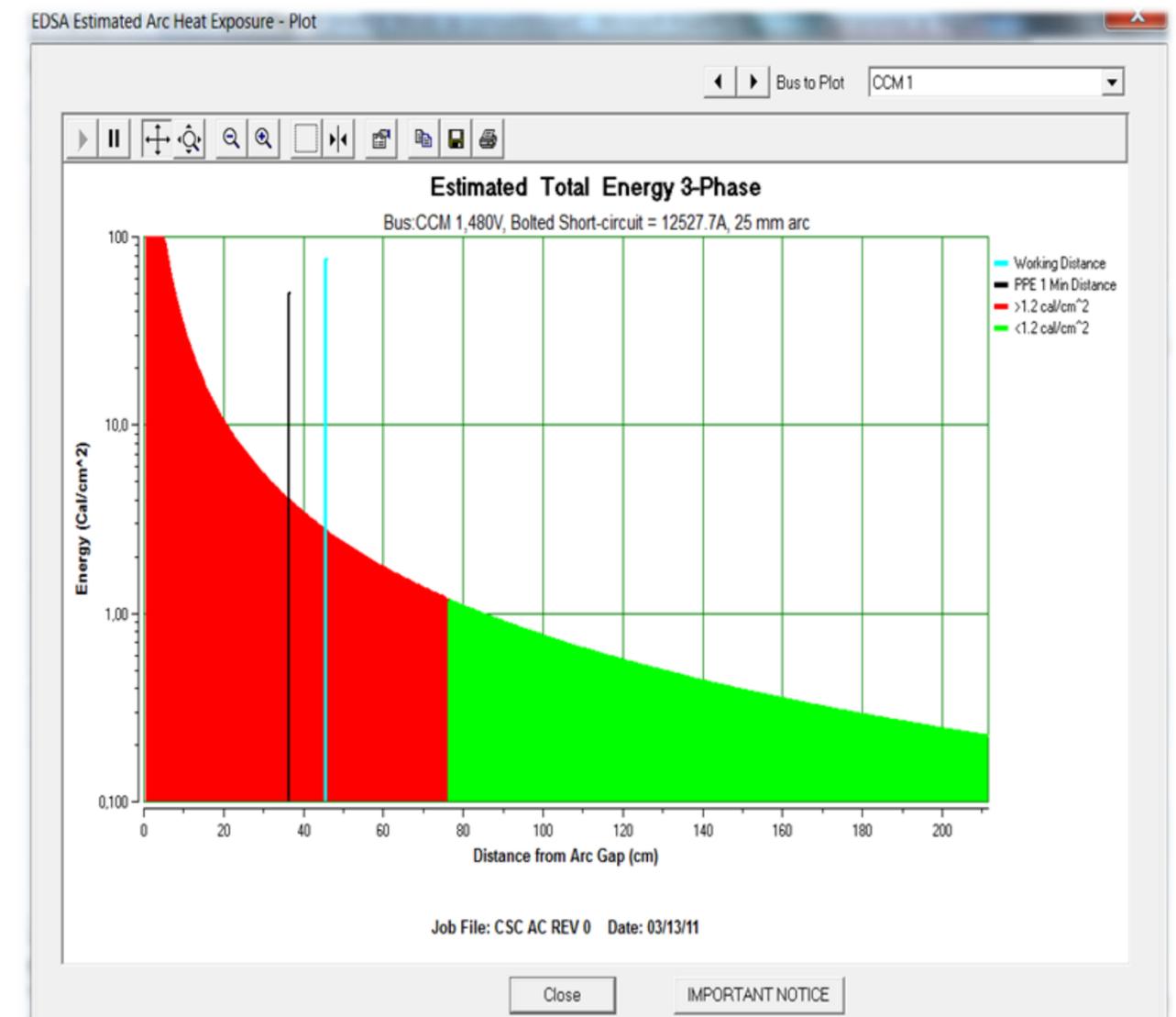
E : es la energía incidente (J/cm²)

C_f : es un factor de cálculo, 1.0 para voltajes superiores a 1kV y 1.5 para voltajes de o inferior a 1kV

t : es el tiempo del arco (segundos)

D : es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)

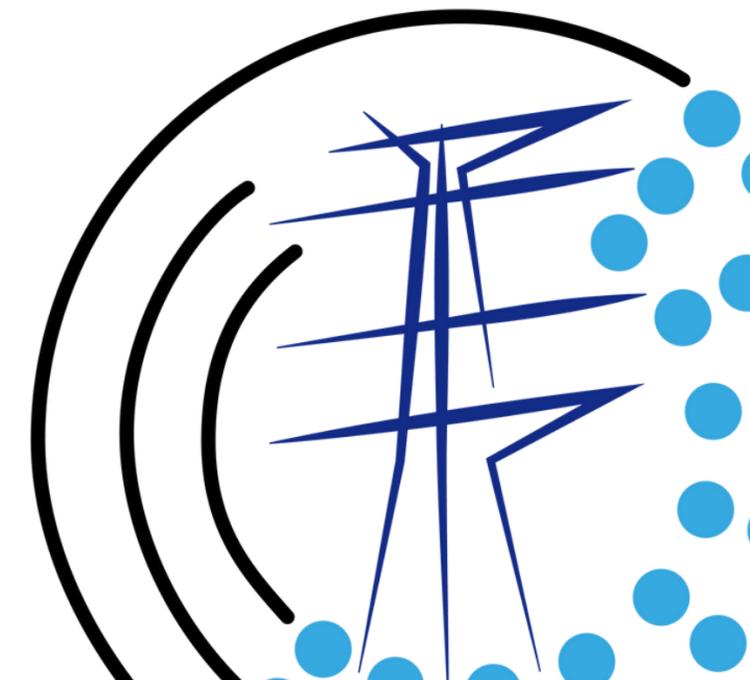
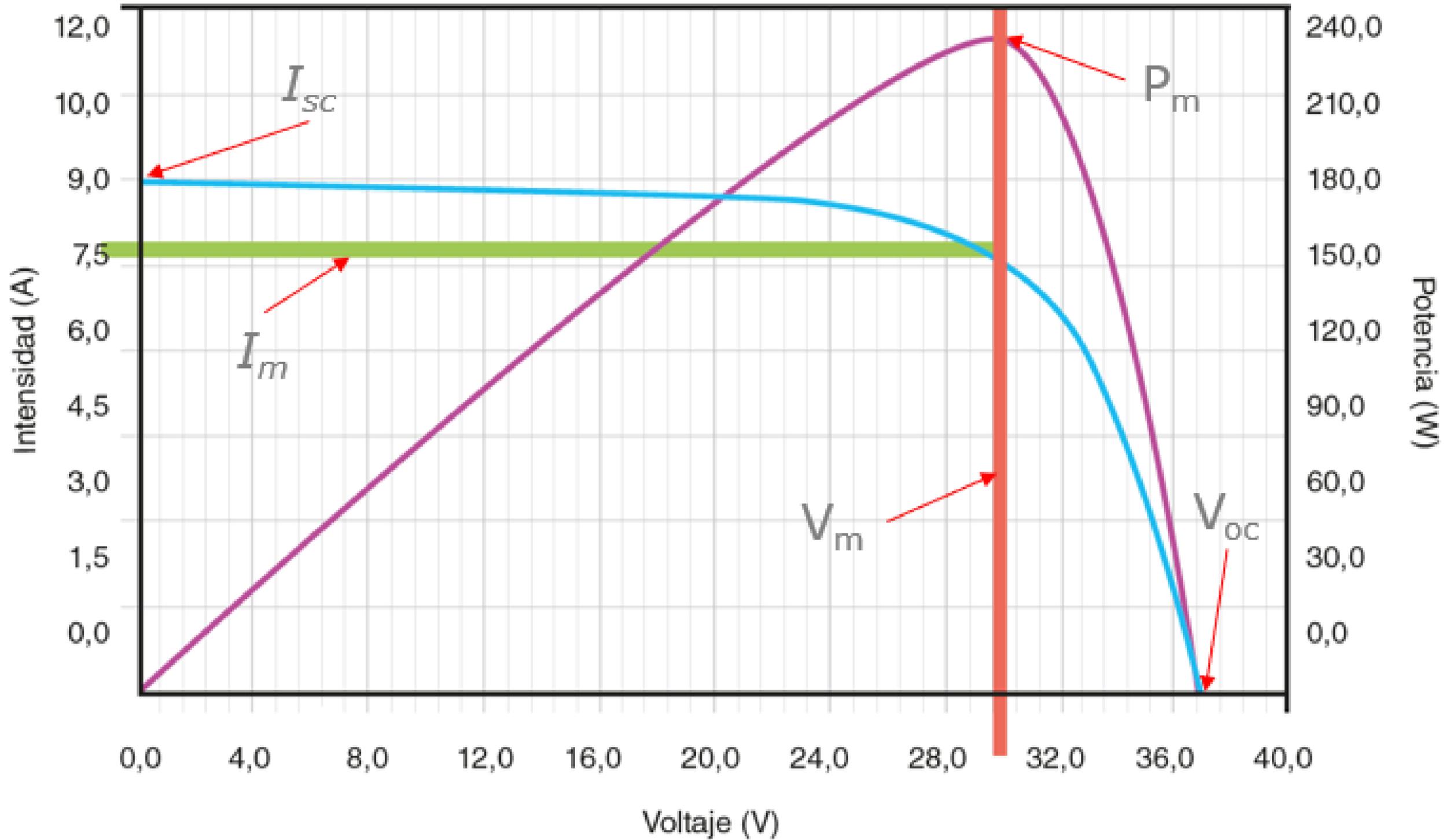
x : es el exponente de distancia de la Tabla 1



Comparación métodos

Parámetro	NFPA 70E	IEEE 1584
Rango de voltaje	208 - 600 V	208 - 15000 V (empírico) > 15 kV (Método Lee)
Rango de corriente	16 - 50 kA	0,7 - 106 kA
Distancia entre conductores	No	Si
Factor "x" de distancia	No	Si
Sistema de puesta a tierra	No	Si
Tipo de instalación	Open air, cubic box	Open air, cubic box, cable bus
Distancia de trabajo	> 18 in	> 18 in
Información de coordinación de protecciones	Si	Si

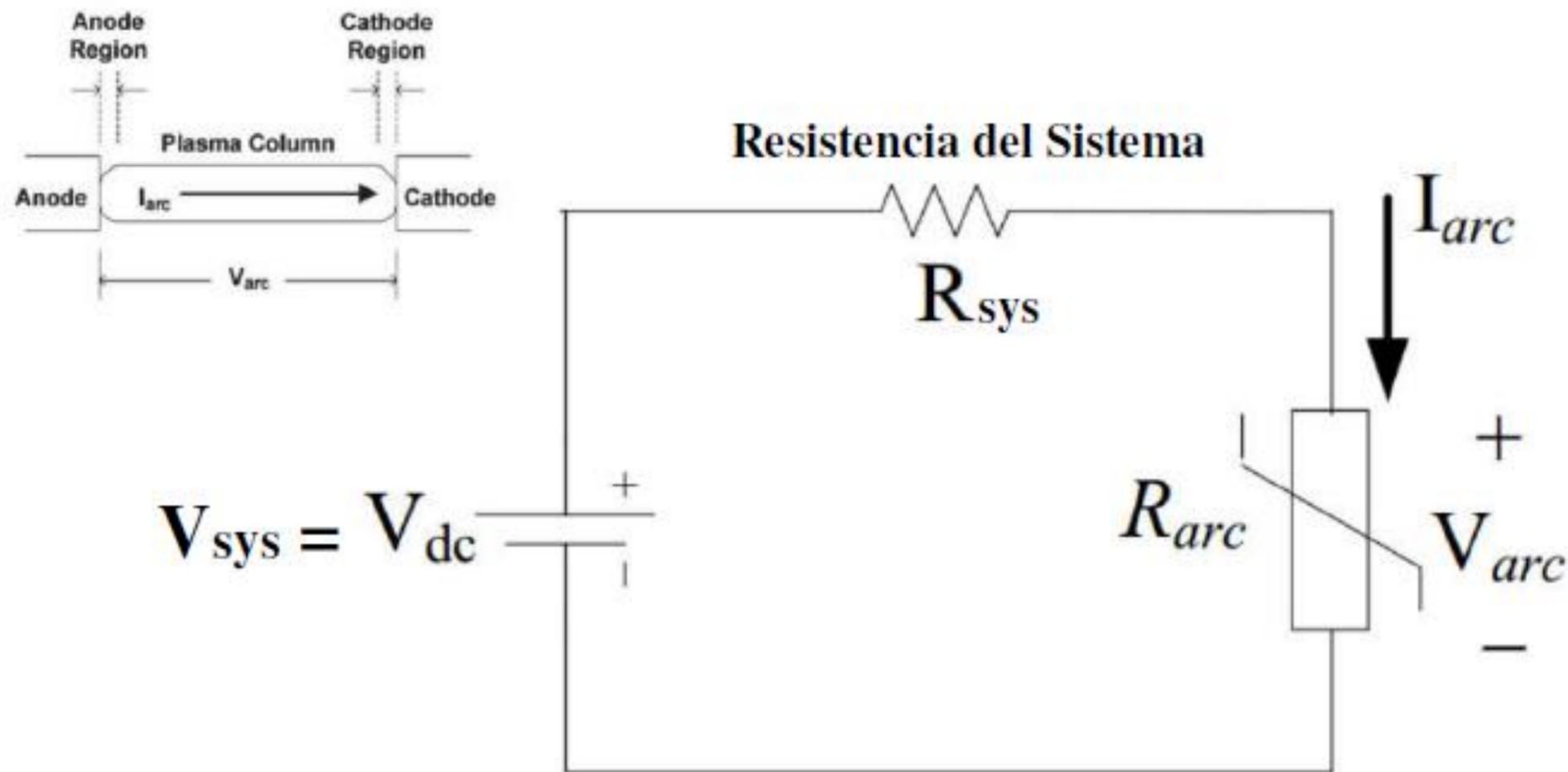
Principales parámetros, paneles solares



Sistemas PV y BESS - UPS

Característica	Sistemas fotovoltaicos	Sistemas BESS - UPS
Fuente de energía	Energía solar	Energía química
Voltaje	Variable (depende de la irradiancia)	Constante
Corriente	Variable (depende de la irradiancia)	Alta y constante
Impedancia	Relativamente alta	Relativamente baja
Riesgo de arco eléctrico	Menor	Mayor
Efectos térmicos	Menores	Mayores
Peligros adicionales	-	Explosión de baterías

Arco eléctrico en DC



Fuente: Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A.

Transferencia de potencia máxima cuando:

$$R_{sys} = R_{arc} \quad (10)$$

$$V_{arc} = \frac{V_{sys}}{2} \quad (11)$$

Método de máxima potencia

Espacios abiertos

$$I_{arc} = \frac{I_{sc}}{2} \quad (12)$$

$$IE = 0.01 * V_{sys} * I_{arc} * \frac{T_{arc}}{D^2} \text{ cal/cm}^2 \quad (13)$$

Donde:

IE: energía incidente (cal/cm²)

V_{sys}: voltaje del sistema (V)

T_{arc}: es el tiempo del arco (segundos)

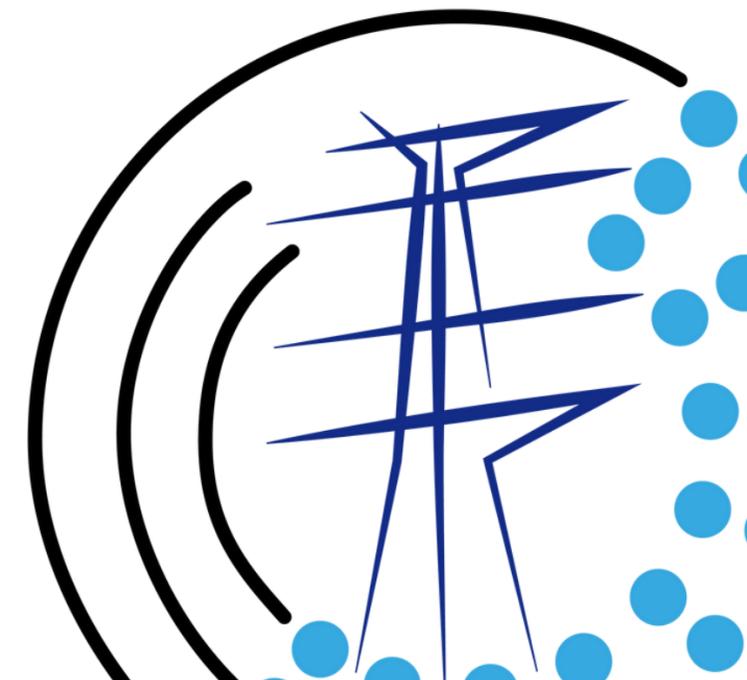
I_{arc}: es la corriente de falla (kA)

D: es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)

Tomado de la NFPA 70E

Espacios cerrados

- NFPA 70E-2021 / Anexo D.5.1
- Se debe considerar una protección de EPP adicional superior a los valores que se muestran en la Tabla 130.7(C)(15)(b).



Otros métodos para análisis de arco eléctrico en DC

Método de máxima potencia

- Puede no ser preciso para voltajes mayores a 1000 Vdc.

Método de Stokes y Oppenlander

- Para calcular la corriente de arco es necesario un procedimiento iterativo.

Método de Paukert

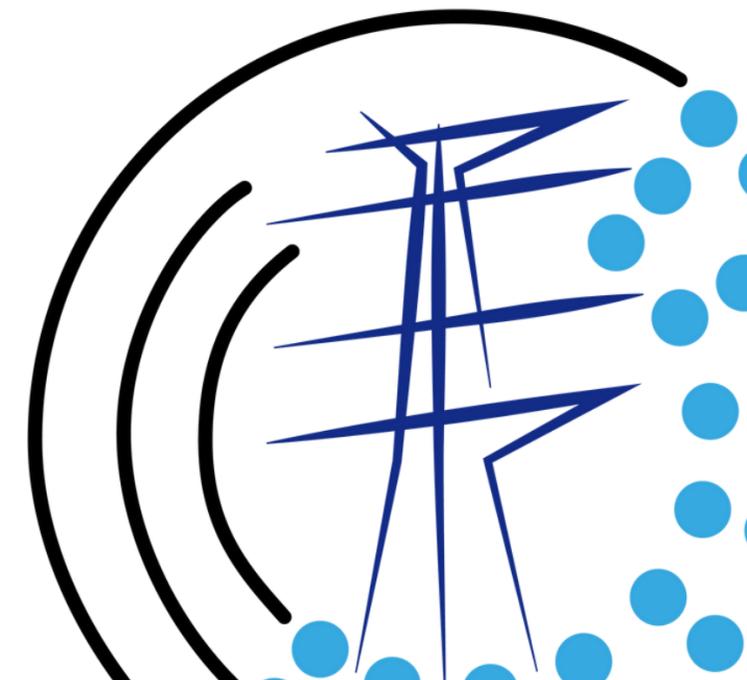
- La misma metodología que el método de Stokes, la corriente de arco no puede ser mayor a 100 kA.

Método de Ayrton

Método de Steinmetz

Método de Nottingham

Método de Van y Warrington



Cálculo del nivel de riesgo

EDSA Theoretical Arc Heat Estimation: CSC AC REV 0

File Database View Help

Step 5 - Fault Data

	Arcing Current (kAmp)		Protective Device Time (sec)		Breaker Opening Time (sec)	Total Duration
	100%	85%	100%	85%		
Bus 3 Phase	7.950	6.919	0.106	0.154	0.000	0.154
Controlling Branch	7.950	6.919				
			Actual	IEEE 1584		IEEE 1584
Phase Gap in mm			25	25		0.050
IEEE 1584 Calc Factor (Cf)			1.5	1.5		
<input checked="" type="checkbox"/> Max Trip Time (sec)			0.154			

Refresh Duration from PDC

Step 6 - Calculate Clothing Needed

Calculate

Clothing Required

Cat 1

Output Report for Calculated Buses

Summary Detailed Custom

Calculation Standards

IEEE 1584 NFPA 70E BOTH

Results to Microsoft Excel

PDC Results

	100%		85%	
	Trip	Open	Trip	Open
3P 3WN6	0.106	0.048	0.154	0.048

Controlling Path

From 89 To CCM1

Bus Name CCM1

Plot Graphic Label Work Permit

< Back Cancel Exit

Ready

EPP contra arco eléctrico

NFPA 70E-2021

Tabla 130.7(C)(15)(c)

Cat. 1: Clasificación mínima 4 cal/cm²

Cat. 2: Clasificación mínima 8 cal/cm²

Cat. 3: Clasificación mínima 25 cal/cm²

Cat. 4: Clasificación mínima 40 cal/cm²

Resultados del estudio

- Energía incidente y nivel de riesgo.
- Definición de la frontera de arco eléctrico.
- Información básica para la elaboración de etiquetas.
- Adecuaciones necesarias a efectuar a los equipos.

Información que debe tener las etiquetas

- Voltaje nominal del sistema.
- Frontera de arco eléctrico.
- Al menos uno de los siguientes:
 1. Energía incidente disponible y la correspondiente distancia de trabajo.
 2. La categoría de arco eléctrico del EPP en la Tabla 130.7(C)(15)(a) o la Tabla 130.7(C)(15)(b) para los equipos pero no ambos.
- Clasificación mínima de ropa de arco.
- Nivel específico de EPP del sitio.



⚠️ ADVERTENCIA

Riesgo de Electrocutación o de Arco Eléctrico Presentar Equipo de Protección Personal Adecuado

Límite de Protección 2.5 m
Energía Incidente 3.2 cal/cm²

CATEGORIA
1

Exposición a Peligro de Descarga 13200 VAC
Guantes Aislantes - Clase 2

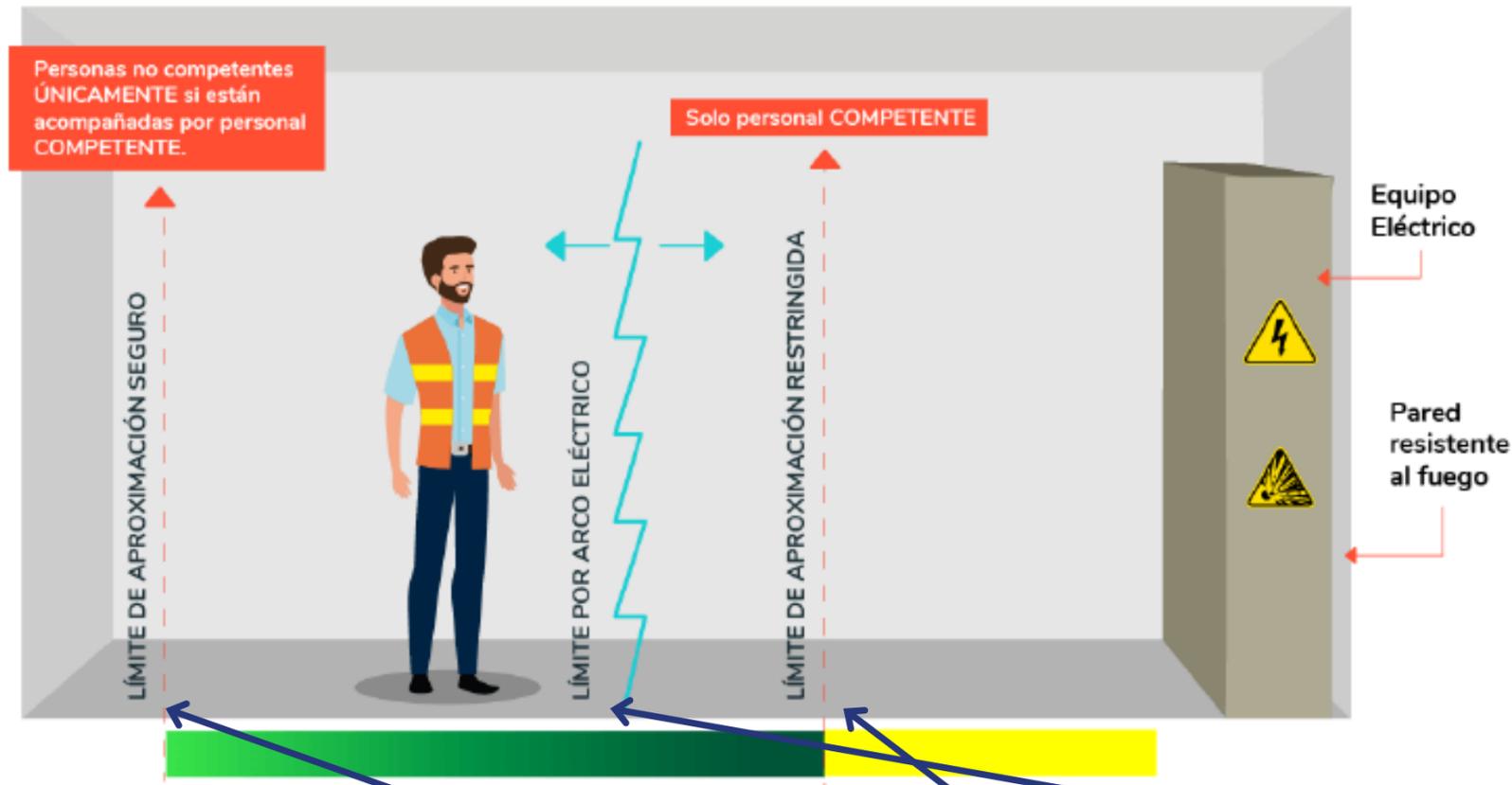
Requerimientos Mínimos de EPP
Camisa resistente al fuego +
pantalones resistentes al fuego u
overol resistente al fuego + gafas
de seguridad + casco + guantes de
cuero + zapatos de cuero.

Frontera de Aproximación Límite 1.5 m
Frontera de Aproximación Restringida 0.7 m

Equipo: 13.2 kV

Date: 13-11-2014

Frontera de arco eléctrico y límites de aproximación



Límites de aproximación

RETIE Res. 40117, Abr. 2/2024

Tabla 3.10.5.b (corriente alterna)

Tabla 3.10.5.c (corriente continua)

⚠ ADVERTENCIA

Riesgo de Electrocutación o de Arco Eléctrico Presentar Equipo de Protección Personal Adecuado

Límite de Protección	2.5 m	CATEGORIA 1
Energía Incidente	3.2 cal/cm ²	
Exposición a Peligro de Descarga	13200 VAC	Requerimientos Mínimos de EPP Camisa resistente al fuego + pantalones resistentes al fuego u overol resistente al fuego + gafas de seguridad + casco + guantes de cuero + zapatos de cuero.
Guantes Aislantes - Clase	2	
Frontera de Aproximación Límite	1.5 m	
Frontera de Aproximación Restringida	0.7 m	

- Solo personal **COMPETENTE**.
- EPP para contacto directo con partes energizadas.
- Autorización requerida.
- Protección contra arco eléctrico.

Clase de aislamiento de los guantes

Voltaje máximo	Clase
500	00
1000	0
7500	1
17000	2
26500	3
36000	4

⚠ ADVERTENCIA

Riesgo de Electrocuación o de Arco Eléctrico Presentar Equipo de Protección Personal Adecuado

Límite de Protección
Energía Incidente

2.5 m
3.2 cal/cm²

CATEGORIA
1

Exposición a Peligro de Descarga **13200 VAC**
Guantes Aislantes - Clase **2**

Requerimientos Mínimos de EPP
Camisa resistente al fuego +
pantalones resistentes al fuego u
overol resistente al fuego + gafas
de seguridad + casco + guantes de
cuero + zapatos de cuero.

Frontera de Aproximación Límite **1.5 m**
Frontera de Aproximación Restringida **0.7 m**

Equipo: **13.2 kV**

Date: **13-11-2014**

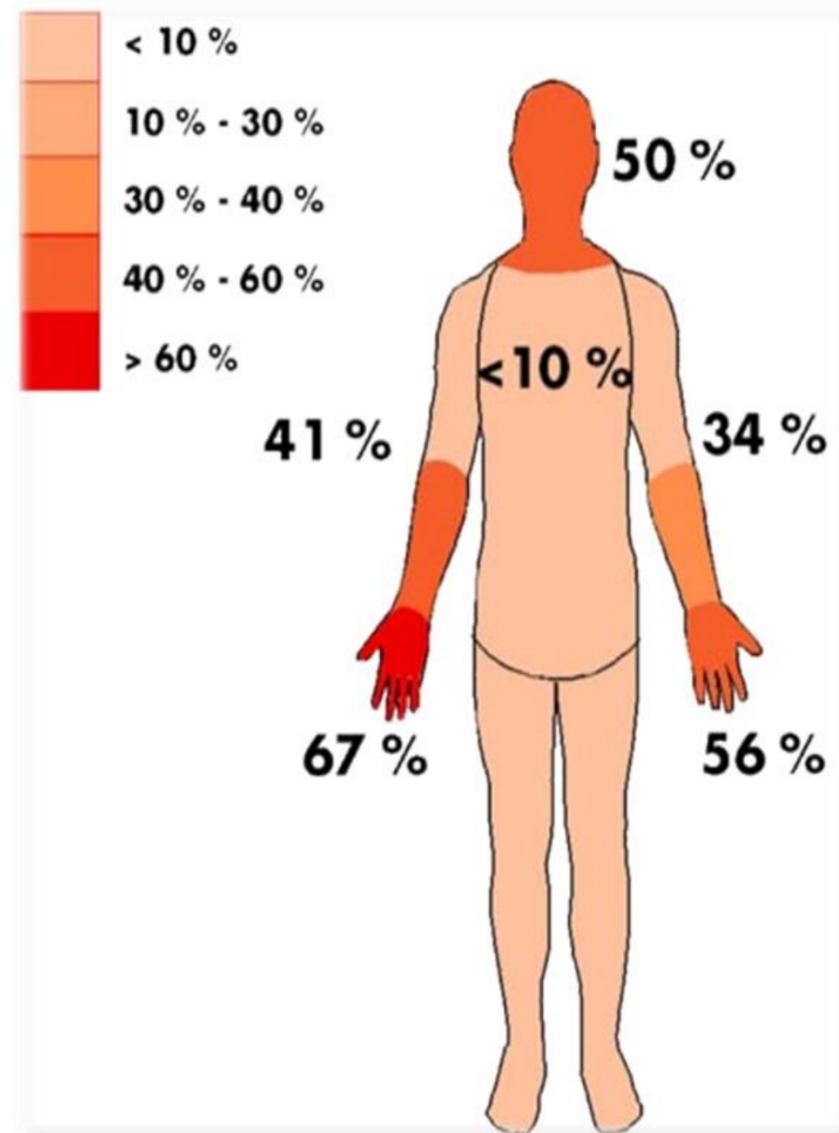
Manejo de la frontera de arco eléctrico

Situaciones consideradas riesgosas en un parque solar

- Operación de interruptores por primera vez o después de un mantenimiento.
- El retiro de paneles atornillados para colocar al descubierto partes energizadas, como terminales de baterías.
- La aplicación de la tierra de seguridad.
- Apertura de compartimientos de transformadores de instrumentación.
- Inspección (manipulación) de cables aislados. Para circuitos CC, conductores expuestos energizados.
- Comprobación de cajas combinadoras con tensión.
- Las configuraciones de generadores fotovoltaicos en paralelo, incrementan considerablemente la corriente de corto circuito.
- Termografía que implique apertura de tableros eléctricos.

NFPA 70E, 130.7(C)(15)(c)

Clasificación de Elementos de Protección Personal - EPP



Cat. 1
Mínima de 4
cal/cm2



Cat. 3
Mínima de 25
cal/cm2



Cat. 2
Mínima de 8
cal/cm2



Cat. 4
Mínima de 40
cal/cm2



Atenuación en la fuente

Medidas operativas y de mantenimiento aplicables:

- Operación remota ON / OFF de equipos.
- Uso de herramientas aisladas Arco Resistentes.
- Consignas de mantenimiento a distancias seguras de acuerdo a EPP.
- Uso de insumos adecuados de mantenimiento que no deterioren el aislamiento.
- Revisión periódica del aislamiento y restauración del mismo si es necesario.



Atenuación en la fuente

Medidas operativas y de mantenimiento aplicables:

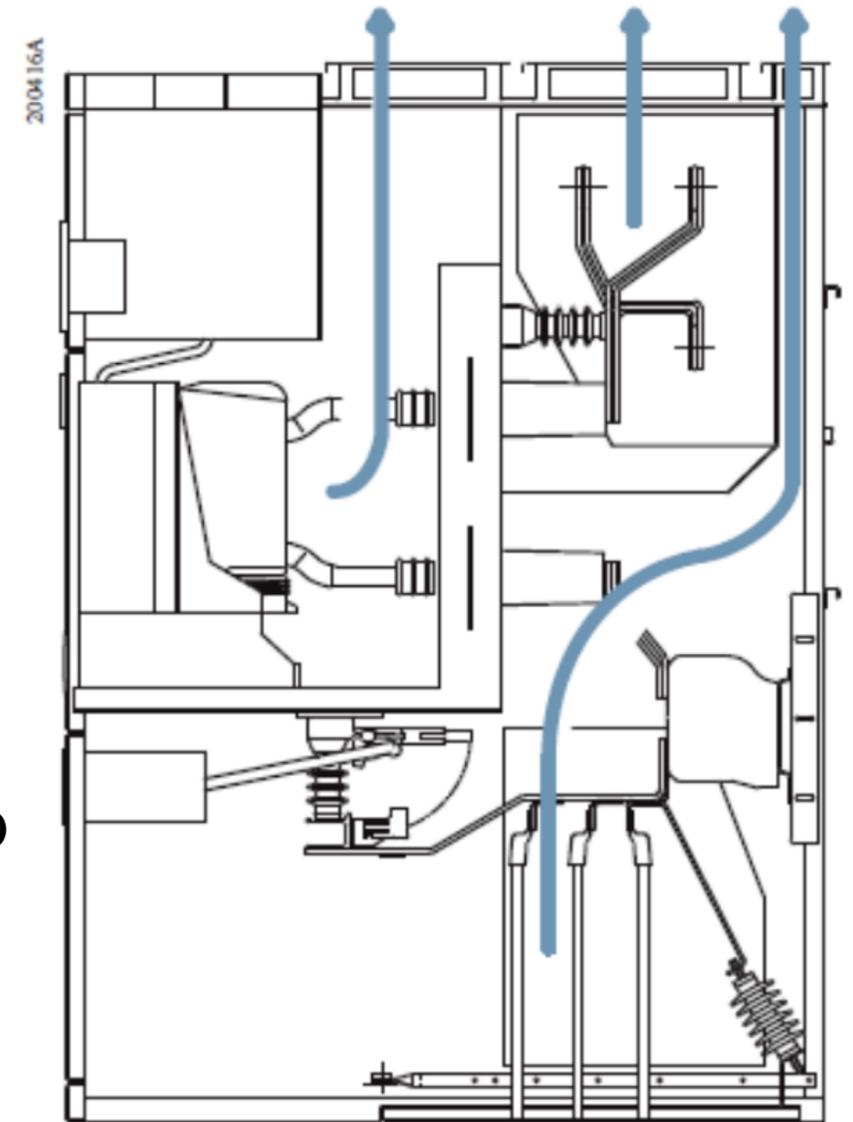
- Diseños optimizados en cuanto a la potencia de reserva.
- No conectar transformadores en paralelo.
- Uso de fusibles rápidos en instalaciones peligrosas.
- Ajuste de protecciones con criterio de seguridad y disponibilidad.



Atenuación en la fuente

Medidas operativas y de mantenimiento aplicables:

- Celdas compartimentadas y aliviadas.
- Interruptor con frente muerto.
- Celdas con frente muerto.
- Sistema constructivo que dirige la explosión de arco lejos del área de trabajo.
- Ajuste de protecciones con criterio de seguridad y disponibilidad.



Gracias Gracias
Gracias Gracias
Gracias Gracias



¡Gracias!

Para cualquier solicitud o inquietud, favor contactarnos.

(+57) 324 442 8539

info@soluproyel.com

www.soluproyel.com

Solu  PROYEL

