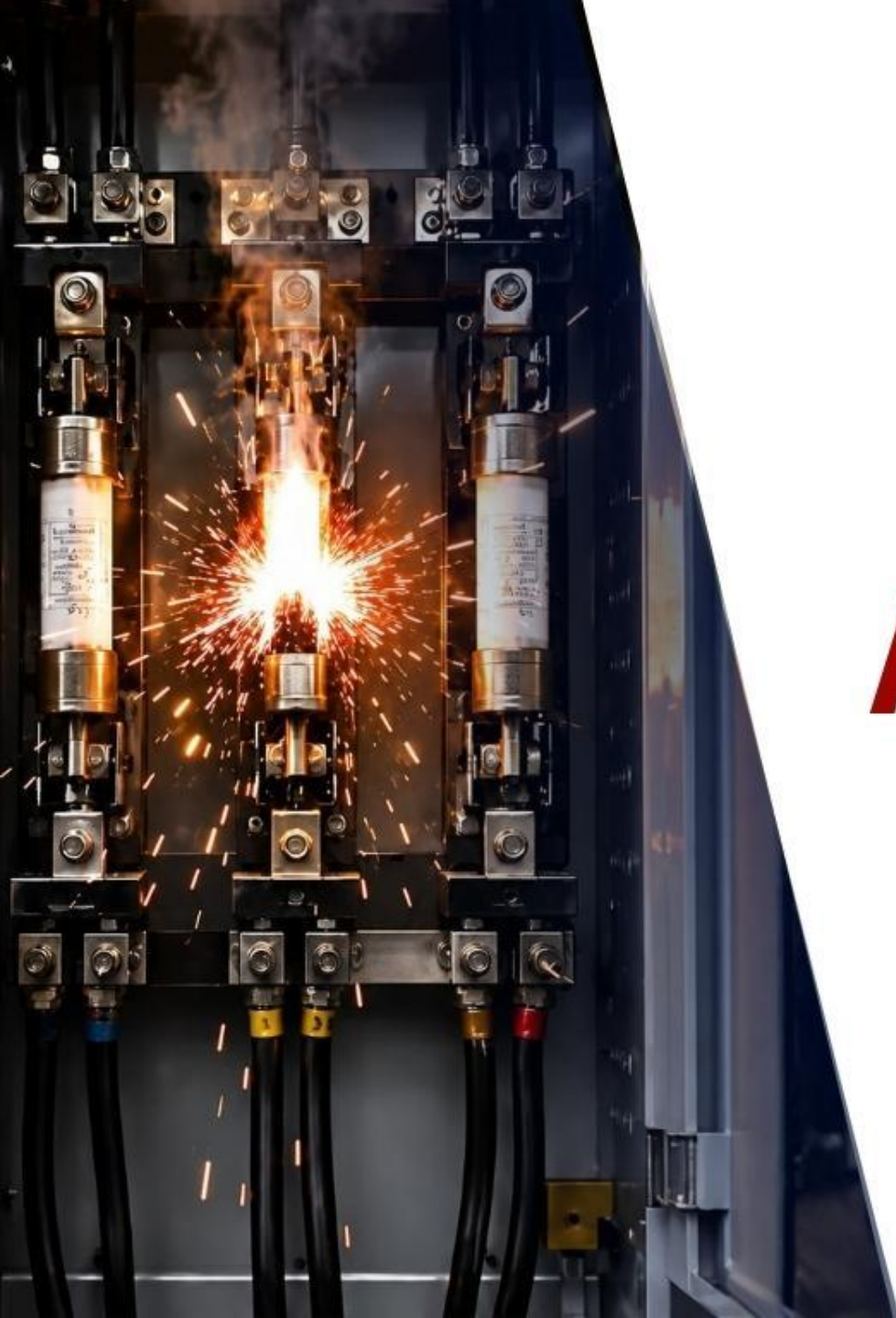




ARC-FLASH



Agenda del Seminario

- 1. Física y Características del Arco Eléctrico**
- 2. Energía Incidente y Efectos Físicos de la Falla**
- 3. Estudios de Arc Flash según IEEE 1584 (AEA 92606) y NFPA 70E**
- 4. Criterios de Selección de Equipos de Protección Personal (EPP)**
- 5. Estrategias y Tecnologías de Mitigación Internacionales**

TRABAJO CON TENSIÓN

Al realizar trabajos eléctricos con equipos energizados, el personal está en riesgo de **Contacto Directo** y expuesto a **Cortocircuitos**.

TRABAJO CON TENSIÓN

Contacto Directo: Es el Contacto Eléctrico de las personas o animales con partes activas, bajo tensión en servicio normal.

Cortocircuito: Camino conductor accidental entre dos o más partes energizadas, forzando a que la diferencia de potencial eléctrico entre ellas sea igual o cercana a cero.

¡¡ARCO ELÉCTRICO!! ¿¿Qué es??

Cuando ocurre un cortocircuito se genera un **Arco Eléctrico** (Arc Flash).

Es el flujo de corriente eléctrica que pasa a través del aire entre conductores de diferente potencial, liberando distintos tipos de energía.

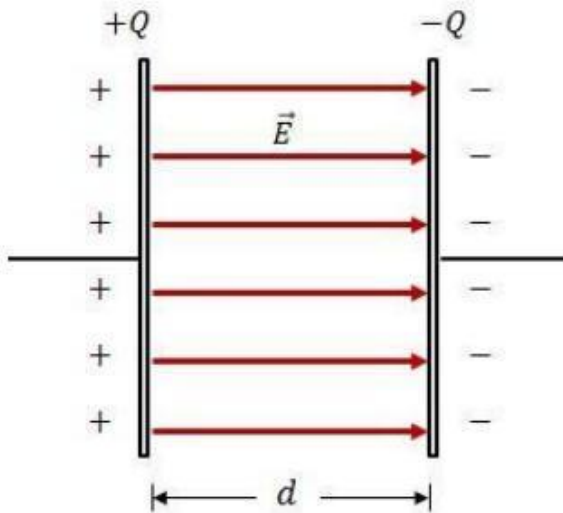
Características Principales

Un arco eléctrico puede alcanzar:

- Temperaturas entre **5.000 y 20.000 °C**
- Luz extremadamente intensa
- Radiación ultravioleta
- Ondas de presión
- Metal fundido
- Gases calientes

¿Cómo se forma un Arco Eléctrico?

El aire es un excelente aislante.



Sin embargo, cuando se modifican algunas características se convierte en conductor.

En ese momento aparece el Arco.

¿Cómo se forma un Arco Eléctrico?

La formación ocurre por etapas:

- 1. Exista una diferencia de potencial**
- 2. Aumenta el Campo Eléctrico**
- 3. Ionización del Aire** (N y O; e- libres; plasma)
- 4. Aparece el Arco Eléctrico** (calor, luz, ruido, presión)
- 5. El Arco Eléctrico se mantiene** (>tensión, hay corriente suficiente, plasma)

Lo anterior podemos resumirlo según las velocidades en que ocurre en:

Relámpago de Arco (Arc Flash) sucede primero, a la velocidad de la luz (300×10^6 m/s) y causa lesiones de quemaduras por la radiación de energía principalmente infrarroja.

Ráfaga de Arco (Arc Blast) ocurre luego, a la velocidad del sonido (343 m/s), manifestándose con una onda expansiva generada principalmente por la evaporación de los metales del equipo, causando heridas por el impacto y por los materiales sólidos y líquidos que proyecta, muchas veces contra el trabajador."

¿Qué puede iniciar un Arco Eléctrico?

Las causas más comunes son:

- Errores humanos
- Aislamiento deteriorado
- Polvo
- Humedad
- Animales
- Sobretensiones
- Otras?....

EFFECTOS

- El fuerte calentamiento y la evaporación de metal provocan una explosión que salpica vapores metálicos.
- **Aumento de presión:** Puede llegar a 20 Tn/m². Cuando la ola de presión no puede extenderse sin impedimentos produce destrucciones mecánicas sobre las instalaciones y daños físicos sobre los trabajadores.
- El aumento de la presión en el momento de encendido del arco eléctrico con la consiguiente detonación explosiva provoca además niveles acústicos superiores a 140 dB, que pueden ocasionar daños al oído humano.
- **Gases tóxicos y metralla:** Los productos tóxicos de desintegración que son liberados al producirse el arco eléctrico constituyen un gran peligro para las personas que se encuentran cerca del lugar pues junto a lesiones externas de la piel también pueden provocar, al inhalarse, graves daños en los pulmones.
- **Incendio:** La fuerte radiación térmica provoca el encendido y la inflamación de los materiales combustibles que se encuentren en los alrededores. Las salpicaduras metálicas originadas por el arco eléctrico refuerzan aún más el peligro de surgimiento de incendio.
- Radiaciones electromagnéticas, principalmente ultravioleta (UV) e infrarroja (IR).

RIESGOS SOBRE LAS PERSONAS

- Quemaduras electrotérmicas provocadas por la energía de radiación del arco eléctrico, así como por las ultravioletas también proyecciones de metales fundidos debido a la alta temperatura.
- Pérdida de la audición provocada básicamente por el ruido y la presión de la onda sonora de choque.
- Lesiones debido a la inhalación de humos tóxicos y calientes provocados muchas veces por la vaporización del cobre.
- Lesiones oculares por deslumbramiento, debido básicamente a la intensidad luminosa que se produce durante este fenómeno eléctrico flash.

BLOQUE II

ENERGÍA INCIDENTE. ¿Qué es?

...

La **Energía Incidente** es la cantidad de energía térmica que recibe una superficie ubicada a una determinada distancia del arco eléctrico.

Es decir, no mide la energía total del arco, sino la energía que llega hasta la persona.

ENERGIA INCIDENTE

La Energía Incidente se expresa en Cal/cm^2

Permite estimar el daño térmico que puede sufrir la piel humana y seleccionar el nivel adecuado de protección personal.

...

ENERGÍA INCIDENTE

¿De qué depende?

Depende principalmente de 4 factores:

1. Corriente de falla
2. Tiempo de duración (Interruptor)
3. Configuración y Dimensiones físicas
4. Nivel de Tensión (más estable, mayor longitud)

CONSECUENCIAS DEL ARC-FLASH

Un arco eléctrico (Arc-Flash) en un tablero de energía es uno de los eventos más destructivos en un entorno industrial. Las consecuencias impactan directamente en la seguridad humana, la continuidad operativa y la economía de las Empresas.

CONSECUENCIAS DEL ARC-FLASH

Daños Humanos e Integridad Personal

- Quemaduras extremas
- Lesiones por onda expansiva
- Daño auditivo
- Daño ocular

CONSECUENCIAS DEL ARC-FLASH

Impacto Operativo y Productivo

- Paro de planta no planificado
- Destrucción de Infraestructura
- Tiempos prolongados de reparación

***“DISCONTINUIDAD DE SERVICIO POR
TIEMPO INDETERMINADO”***

CONSECUENCIAS DEL ARC-FLASH

Impacto Económico y Legal

- Costos por tiempo de inactividad
- Reemplazo y reparaciones
- Penalizaciones y Demandas

CONSECUENCIAS DEL ARC-FLASH

Impacto Social

ESTUDIO DE ARC-FLASH

Análisis de Riesgo

Norma IEEE 1584-2018

...

ESTUDIO DE ARC-FLASH

Análisis de Variables

- Se requiere haber efectuado el estudio de corto circuito de manera detallada, determinando los valores máximos y mínimos de la corriente de falla.
- Haber efectuado un estudio de coordinación de protecciones.
- Realizar el estudio de Niveles de energía según la Guía IEEE Std. 1584-2018.

Norma IEEE 1584-2018

Es el estándar de referencia a nivel mundial para calcular la energía de relámpago de arco eléctrico (arc flash) en instalaciones industriales y comerciales.

Su objetivo principal es proveer las ecuaciones matemáticas y la metodología para determinar la **energía incidente** a la que podría estar expuesto un trabajador y la **frontera de relámpago de arco**

Frontera de Relámpago de Arco

Es la distancia de seguridad calculada desde una fuente de arco eléctrico expuesta (como un tablero, interruptor o transformador energizado) dentro de la cual una persona sufriría quemaduras de segundo grado si ocurriera un fallo por arco.

...

Energía Incidente = 1.2 cal/cm² (5.0 J/cm²)

Norma IEEE 1584-2018

Rango de Aplicabilidad

El modelo matemático es válido si se cumple:

Tensión Nominal: 208 a 15.000 Volts

Frecuencia: 50 ó 60 Hz

Corriente de Cortocircuito: 0,2 a 106 KA

Distancia entre conductores: 6 a 254
mm

Distancia de trabajo: Mayor a 305 mm

Norma IEEE 1584-2018

Procedimiento de Cálculo

Se divide en etapas estructuradas:

- 1. Recopilación de Datos e Inspección** (Tensión, Corriente de Cortocircuito, Tamaño del gabinete, Disposición geométrica de conductores y Tiempo de Despeje de las fallas)
- 2. Cálculo de la Corriente de Arqueo** (menor que la de Cortocircuito)
- 3. Factor de Corrección por Tamaño de Gabinete**
- 4. Cálculo de la Energía Incidente**
- 5. Cálculo de la Frontera de Relámpago de Arco**

Norma IEEE 1584-2018

Aplicación Práctica e Integración con NFPA 70E

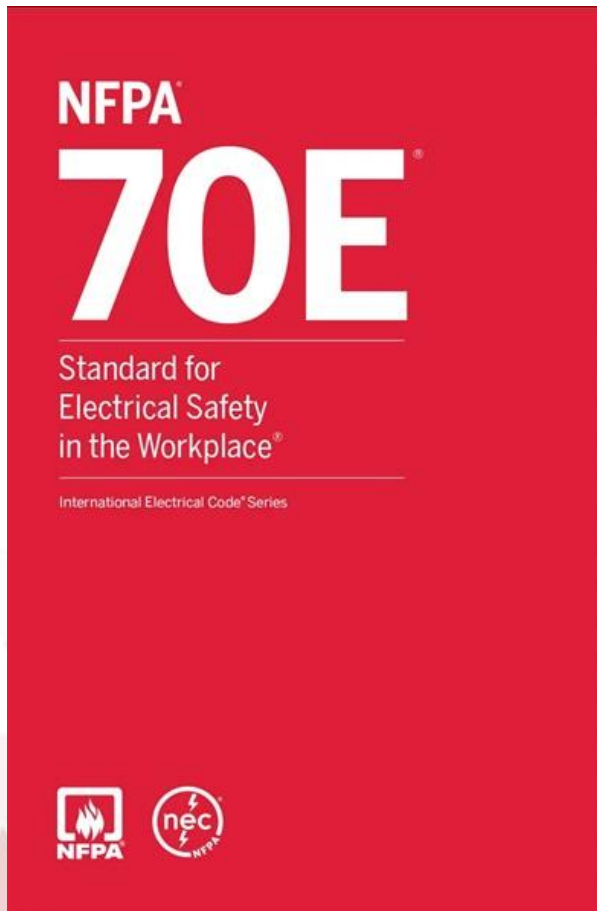
Los resultados obtenidos mediante la IEEE 1584-2018 no se quedan en el papel; son el insumo principal para cumplir con normativas de seguridad eléctrica como la **NFPA 70E**:

- Selección del Equipo de Protección Personal (EPP)
- Etiquetado de Advertencia

Norma NFPA 70E-2018

Seguridad Eléctrica en los Lugares de Trabajo

Las Prácticas y Procedimientos de esta Norma están destinados a proporcionar seguridad a los operarios ante los riesgos eléctricos en los lugares de trabajo.



Norma NFPA 70E-2018

PRINCIPIOS BASICOS DE LA NORMA

- Para trabajar con seguridad en instalaciones eléctricas, corte la corriente. Y si no se puede evitar trabajar en sistemas desenergizados, póngase el equipo de protección personal (EPP) adecuado para protegerse de los riesgos de las descargas y arcos eléctricos.
- Establece las categorías de los riesgos. Cuanto mayor sea el entorno eléctrico, más seguro deberá ser el equipo de protección personal (EPP) para poder soportar un incidente de arco eléctrico.

Norma NFPA 70E-2018

Niveles de Riesgo



MAS DE 40 cal/cm² " NO SE DEBEN OPERAR EQUIPOS EN FORMA DIRECTA"

Norma NFPA 70E-2018

DISTANCIAS DE SEGURIDAD

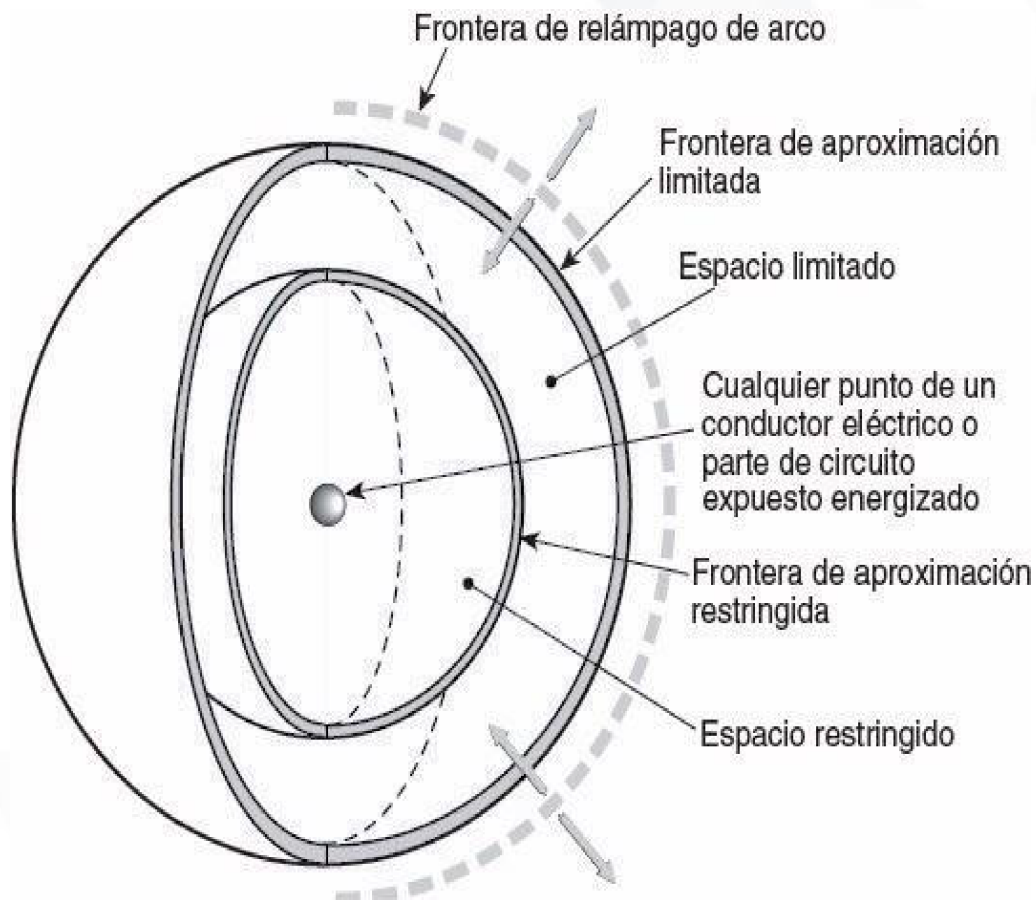
Frontera de Aproximación

Restringida: Solamente personal calificado puede ingresar a la zona delimitada por esta frontera, requiriendo la misma protección que utilizaría si se estuviera haciendo contacto directo con la parte viva.

Frontera de Aproximación Limitada:

Personal no calificado puede ingresar a la zona delimitada por esta frontera, usando los EPP adecuados y bajo supervisión de un calificado.

Fuera de la **Frontera de Relámpago de Arco** pueden estar personas sin ningún tipo de protección.



Normas IEEE 1584 – NFPA 70 E

Existe una interdependencia directa entre ambas Normas

División de Funciones

Aspecto	IEEE 1584-2018	NFPA 70E-2018
Enfoque	Ingeniería y Cálculo	Seguridad en el Trabajo
Objetivo	Determinar la magnitud física del peligro (cuánta energía se libera).	Definir cómo deben actuar las personas para trabajar sin riesgo.
Resultado final	Números: Energía Incidente (cal/cm^2) y Frontera de Arco (m).	Acciones: Selección de EPP, permisos de trabajo, etiquetas y zonas seguras.
Audiencia	Ingenieros electricistas y analistas de sistemas.	Jefes de seguridad (HSE), electricistas y contratistas.

S.A.

Normas IEEE 1584 – NFPA 70 E

Flujo de Trabajo en la Industria

Ingeniería	Evaluación	Implementación
IEEE 1584 - 2018	NFPA 70 E - 2018	Acción en sitio
Calcula la Energía Incidente y la Frontera de Relámpago de Arco	Toma los datos y determina la Categoría de los EPP requerida	El trabajador lee la etiqueta, usa los EPP y respeta los límites

Norma NFPA 70E-2018

Etiquetado de Arco Eléctrico

Código de colores RAL		
	Color	RAL
Categoría 0	Verde	6032
Categoría 1	Azul	5005
Categoría 2	Amarillo	1003
Categoría 3	Naranja	2010
Categoría 4	Rojo	3001
Excede categorías	Violeta	4008

Según AEA 92606-2023

Norma NFPA 70E-2018

Etiqueta de Arco Eléctrico

ADVERTENCIA		Categoría			
		2			
RIESGO DE ARCO ELECTRICO Y ELECTROCUCION SE REQUIERE EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL ESPECIFICO					
3,4 m	LIMITE DE RIESGO de ARCO ELECTRICO con puertas abiertas o tapas removidas				
4,37 cal/cm2	Nivel de energía calorífica a 0,91 m				
Categoría: EPP requerido Camisa mangas largas y pantalón para ArcFlash. ATPV mínimo del conjunto 8 cal/cm2 Guantes aislantes clase 2 - Guantes de cuero Pasamontañas Arc-Flash. ATPV mínimo de 8 cal/cm2 Casco y protector facial de uso eléctrico HRC2. ATPV mínimo 8 cal/cm2 Lentes de protección Protectores auditivos Calzado de protección					
13800V	RIESGO DE ELECTROCUCION con puertas abiertas o tapas removidas				
0,80 m	Límite de aproximación				
Tablero: "Nombre de tablero"					
Estudio de arco N°: "Número de documento interno"			Fecha de Realización: DD/MM/AAAA		
Fecha Revisión	Día	Mes	Año	Firma	Aclaración

Según AEA 92606-2023

DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP

EPP COMÚN A TODAS LAS CATEGORÍAS



Casco
(Cat 3 y 4)



Lentes de
seguridad



Zapato dieléctrico
de piel



Protección
auditiva



Ropa
interior de
algodón



PYRE S.A.

DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP



DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP



DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP

LLT ARC - ATPV 55 CAL/cm² Jacket



LLT - ATPV 55 CAL/cm² Hood



LLT ARC Trousers-
ATPV 55 CAL/cm²



LLT ATPV 55 CAL/cm² Gloves



Du Pont Protera - Triple Layered system

Arc flash Inherently flame retardant - (not treated material)
33%, Nomex/ Kevlar 65%, Modacrylic , 2% and Antistatic liners
Our garments vary in colours from Orange, Brown , Olive , Royal blue & Navy blue.



DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP



DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

EPP

GUANTES AISLADOS Y GUANTES DE PIEL

USO MAXIMO DE LOS GUANTES AISLANTES DE CAUCHO

CLASE	VOLTAJE DE PRUEBA AC / DC	VOLTAJE DE USO MAXIMO AC / DC
00	2500 / 10,000	500 / 750
0	5,000 / 20,000	1,000 / 1,500
1	10,000 / 40,000	7,500 / 11,250
2	20,000 / 50,000	17,000 / 25,500
3	30,000 / 60,000	26,500 / 39,750
4	40,000 / 70,000	36,000 / 54,000



BLOQUE III

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Para mitigar el riesgo de arco eléctrico (Arc Flash), la ingeniería moderna migró del enfoque puramente reactivo (uso de EPP) hacia el concepto de **Jerarquía de Controles**, priorizando la eliminación del riesgo desde el diseño conceptual del sistema eléctrico.

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Jerarquía de Controles

1. ***Física de la Mitigación: El parámetro crítico (Energía incidente)***
2. ***Protecciones Activas de última generación (Reducción del tiempo)***
3. ***Mitigación Pasiva (Diseño y Geometría de tableros)***
4. ***Mitigación por Reducción Operativa del Riesgo***

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Física de la Mitigación

Toda la tecnología de protección contra arco eléctrico gira en torno a controlar la fórmula de la Energía Incidente (E_i), definida según IEEE 1584:

$$E_i = f (I_{arc} \times t / D^2)$$

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Física de la Mitigación

- **Reducción de la corriente de cortocircuito de arco (I_{arc}):**
 - Uso de transformadores de menor Potencia (menor I_{cc})
- **Reducción del tiempo de despeje de falla:** La energía incidente (E_i) es directamente proporcional al tiempo de despeje (t).
- **Sistemas de Reducción de Energía:** Interruptores con modos de disparo configurables (juegos de ajuste)

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Protecciones Activas de última Generación

- **Relés de Arco con Enclavamiento Selectivo de Zona (ZSI)**

Permite comunicación digital entre el interruptor aguas abajo y el aguas arriba. Si el interruptor principal detecta la corriente de falla pero no recibe señal de bloqueo del secundario, asume que el arco está en su propio barraje y dispara sin retardo intencional.

- **Detección Óptica por Sensado de Luz y Corriente**

Combina sensores de fibra óptica puntual o de bucle (point/loop sensors) instalados en las celdas con relés dedicados.

- **Interruptores de Puesta a Tierra Ultra Rápida (UFES):**

Es la tecnología más avanzada de extinción activa. Al detectar un arco, activa un cartucho pirotécnico o un solenoide electromagnético que cierra una cuchilla trifásica a tierra en un ambiente sellado al vacío.

MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Mitigación Pasiva

Si las protecciones activas fallan, se busca contingencia estructural, el diseño del tablero debe contener mecánicamente el evento.

- **Clasificación Arc-Resistant:**

- Accesibilidad Tipo 2B: Diseñado para proteger al operador ubicado en el frente, laterales, parte posterior e interior de compartimentos de control durante el evento.
- Ductos de Venteo (Arc Chutes): Canales superiores provistos de discos de ruptura (flaps) que canalizan los gases a alta presión y temperatura hacia una zona exterior segura fuera de la sala eléctrica.

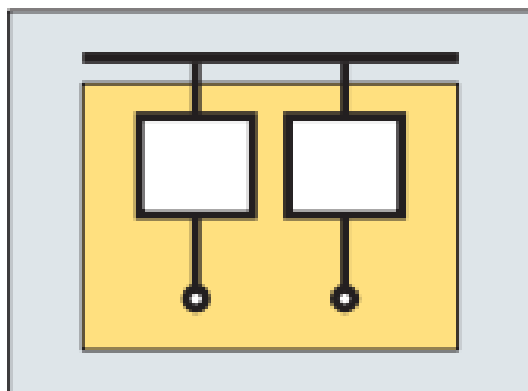
- **Segmentación Interna y Barreras de Aislamiento:**

- Configuración Forma 4b (IEC 61439): Separación física entre barras principales, unidades funcionales (interruptores) y terminales de cables. Evita que un arco iniciado en un terminal de cables migre al barraje principal y destruya todo el tablero.

Mitigación Pasiva

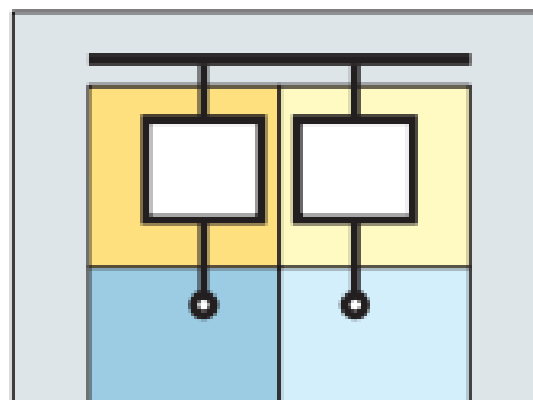
Forma 2b

Terminales separados
de las barras



Forma 4b

Terminales no en la misma celda
como unidad funcional asociada



MITIGACIÓN DEL ARC-FLASH

Mitigación por Reducción Operativa del Riesgo

Tecnologías diseñadas para eliminar la presencia humana durante la maniobra (aumentar la distancia D):

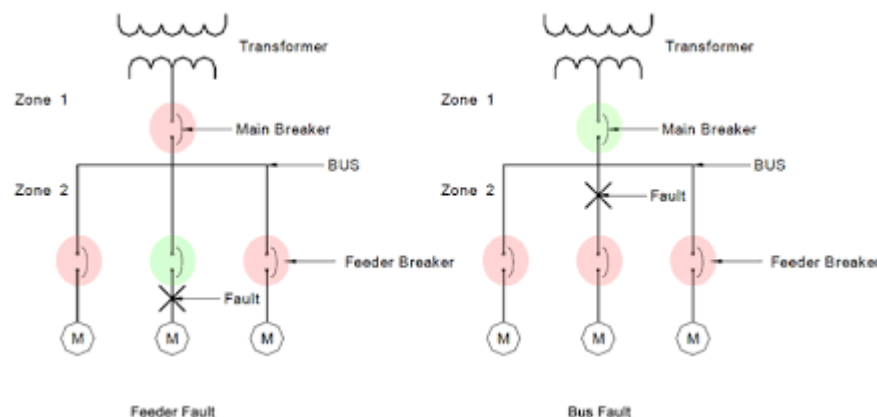
- Enclavamiento y Mandos Remotos (Remote Racking & Operation)
- Sistemas de Reducción de Energía por Mantenimiento:
 - Conmutador selector (físico o por software) que temporariamente modifica la curva de disparo del interruptor a un nivel instantáneo estricto (pickup muy bajo y retardo cero) mientras el personal realiza tareas en el tablero

ZONE SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)

...

Enclavamiento selectivo de zona

es un protocolo de comunicación lógica punto a punto entre unidades de disparo electrónicas (trip units) o relés de protección. Su objetivo principal es resolver el conflicto clásico entre **coordinación de protecciones (selectividad)** y **rapidez de despeje para reducir energía incidente por arco eléctrico**.



ZONE SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)

El Dilema: Tradicional vs Solución ZSI

En una instalación convencional sin ZSI, para garantizar que un corto en un circuito secundario no apague toda la planta, el interruptor principal (Main) se programa con un **retardo intencional de tiempo corto** (*SDT*, típicamente 0.2 a 0.5 segundos) mientras el derivado (Feeder) actúa de forma instantánea.

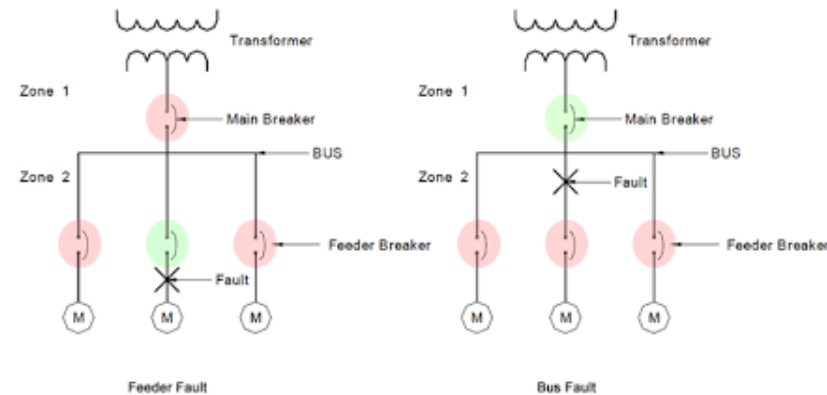
- **El problema de la coordinación convencional:** Si la falla ocurre **directamente en las barras del tablero** (Bus Fault), el interruptor derivado no la ve. El interruptor principal debe esperar todo el tiempo de retardo (*SDT*) para disparar. Durante esos 200-500 ms, la energía de arco se dispara a niveles extremadamente destructivos (categoría de EPP 4 o inaccesible).
- **La solución ZSI:** Introduce una línea de señalización cableada o por bus entre las unidades de disparo. Permite que el interruptor principal determine **dónde** está la falla y decida si dispara de forma **instantánea** (falla en barra) o si **espera** (falla aguas abajo).

ZONE SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)

Lógica de Funcionamiento

Caso A: Falla Aguas Abajo (En la carga / derivado)

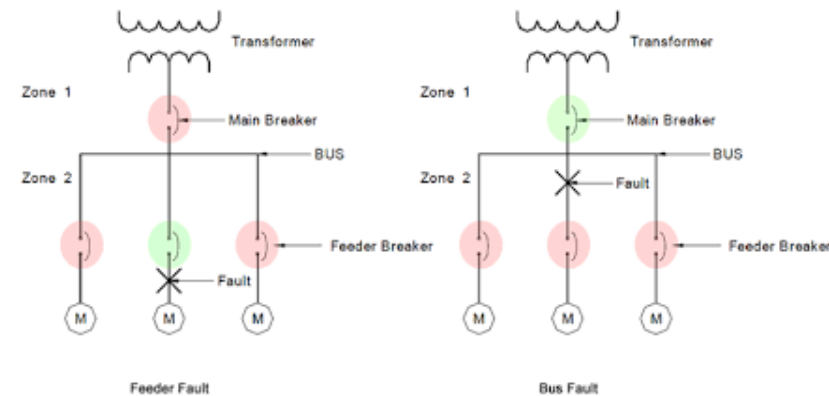
- Tanto el interruptor Feeder como el Main detectan la sobrecorriente.
- El interruptor Feeder envía instantáneamente una **señal de bloqueo** al interruptor Main vía el bus ZSI.
- Al recibir la señal, el interruptor Main mantiene su retardo temporizado de seguridad para preservar la selectividad.
- El interruptor Feeder abre y aísla la falla de forma local sin interrumpir el resto del tablero.



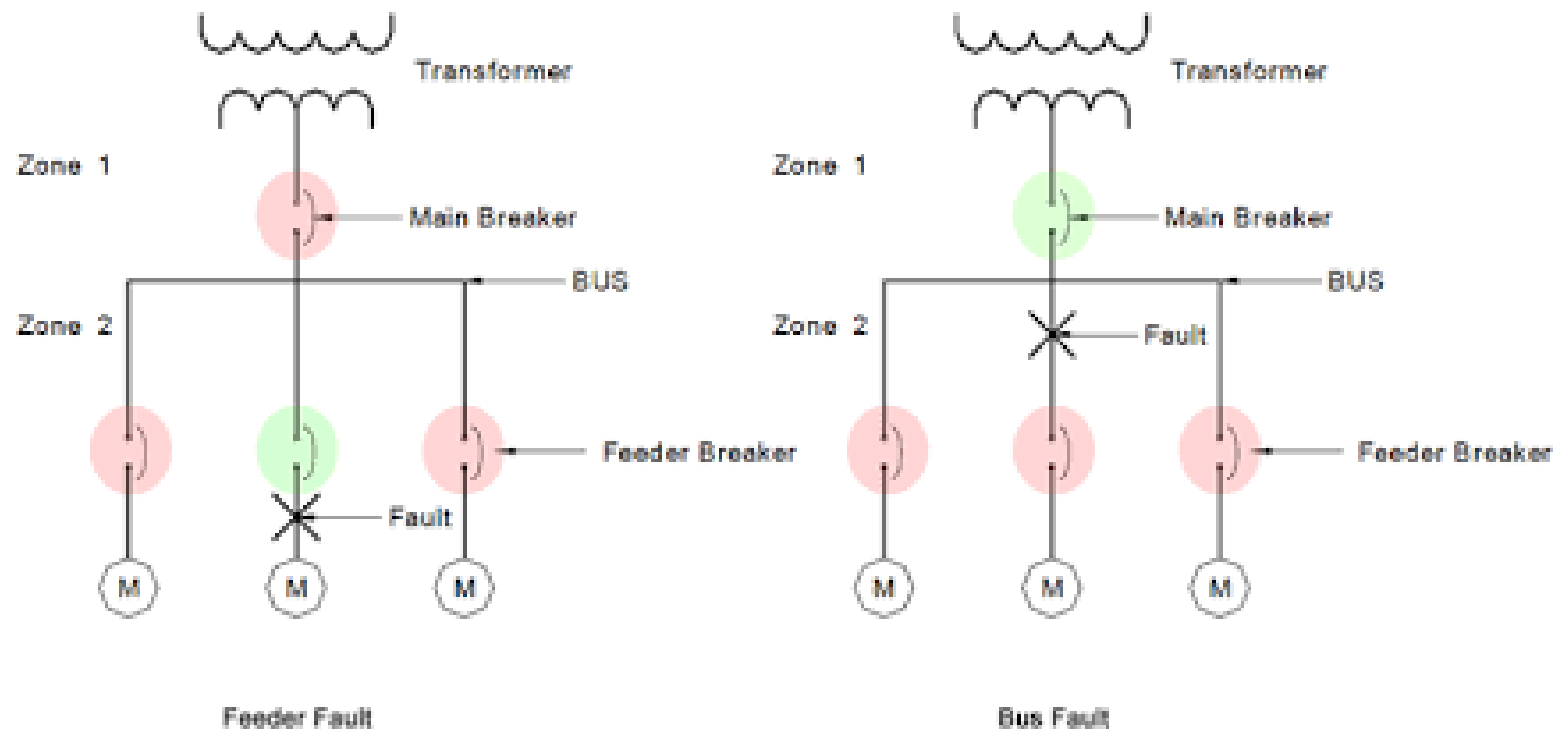
ZONE SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)

Lógica de Funcionamiento

- **Caso B: Falla en la Barra Principal (Bus Fault)**
- La falla ocurre directamente en el barraje del tablero. El interruptor Main detecta la severa sobrecorriente.
- Ningún interruptor Feeder detecta sobrecorriente, por lo que **nadie envía la señal de bloqueo** al Main.
- El interruptor Main interpreta la ausencia de señal de bloqueo como una "falla en su propia zona de protección".
- El Main anula instantáneamente su temporizador de retardo y **dispara de inmediato (~50 ms total de apertura)**.



SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)



SELECTIVE INTERLOCKING (ZSI)

Ventajas

- Selectividad Total + Alta Velocidad
- Bajo Costo de Implementación
- Reducción de Requerimientos de EPP

Limitaciones

Requiere Integridad de Cableado

Zonas de Protección Finitas

ARCO ELECTRICO

- 1. INTERPRETACION DEL ARCO**
- 2. DIMENSIONAMIENTO DE DAÑOS**
- 3. CALCULO DE ENERGIA IEEE 1584**
- 4. DETERMINACION DE EPP NFPA70E**
- 5. MITIGACION DE ARCO**

...