

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE FLAMEO POR ARCO

JOHN ALEXANDER HERRERA ORDÓÑEZ

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA

2008

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE FLAMEO POR ARCO

JOHN ALEXANDER HERRERA ORDÓÑEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director  
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES  
Doctor Ingeniero Electricista

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA

2008

A mi esposa

Jennifer Maldonado

A mi madre

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al doctor Hermann Raúl Vargas Torres, director del proyecto por su constante dirección y asesoría y sin cuya ayuda hubiera sido imposible el desarrollo de este proyecto.

A Jennifer mi esposa, por su apoyo incondicional y las palabras de aliento en los momentos más difíciles.

A Aldo Marco González, coordinador de proyectos y en general a todo el departamento de proyectos de COPOWER LTDA por la colaboración para el desarrollo de este proyecto.

A mi madre, por el apoyo moral y económico sin condiciones.

## RESUMEN

**TÍTULO:**

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE FLAMEO POR ARCO\*

**AUTOR:**

JOHN ALEXANDER HERRERA ORDÓÑEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:**

Riesgos ante flameo por arco, corriente de falla, corriente de arco, energía incidente, selección de ropa y elementos de protección personal.

**DESCRIPCIÓN:**

Este trabajo de grado propone dar una guía para minimizar el riesgo ante un evento de flameo por arco, mediante la realización de un estudio de riesgos, además de establecer los elementos de protección necesarios para reducirlo a niveles tolerables. Inicialmente se da una explicación de los factores que inciden en la iniciación de este fenómeno, explicando sus formas de liberación de energía, luego se propone una presentación de procedimientos generales extraídos de la normativa internacional, relacionados con la seguridad eléctrica, posteriormente se da una guía para llevar a cabo un análisis de riesgos ante flameo por arco, que incluye la revisión de los métodos actuales de cálculo necesarios para cuantificar el riesgo ante un evento de flameo por arco. Este análisis se hace basado en las normas [NFPA 70E, 2004] e [IEEE 1584, 2002] e incluye el cálculo de la energía incidente como el parámetro mas importante en el desarrollo de este estudio, finalmente y después de estimado el riesgo y dependiendo del nivel de energía incidente, se dan los parámetros necesarios para tener en cuenta durante la selección de la ropa y elementos de protección personal y la búsqueda de métodos tales como la disminución del tiempo de despeje de los dispositivos de protección o la implementación de dispositivos específicos de protección.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raúl Vargas Torres.

## SUMMARY

**TITLE:**

ARC FLASH HAZARD ANALYSIS\*\*\*

**AUTHOR:**

JOHN ALEXANDER HERRERA ORDOÑEZ\*\*\*\*

**KEY WORDS:**

Arc flash hazard, fault current, arc current, incident energy, personal protective equipment selection.

**DESCRIPTION:**

This thesis proposes a guide for minimizing arc flash hazards, through the arc-flash hazard analysis, as well as establishes the necessary personal protective equipment to reduce it to tolerable levels. At the beginning there is an explanation about the factors that influence the initiation of the phenomena, explaining the the ways of energy release, then, there is a presentation of general safety procedures and methods from international standards, subsequently there is a guide for arc flash hazard analysis that includes a revision of the necessary methods of calculation to predict the arc-flash hazards. The analysis is based on [NFPA 70E, 2004] and [IEEE 1584, 2002] standards, and includes the incident energy calculation as the most important parameter in the arc-flash hazard analysis, finally, after the risk level has been calculated, there is a guideline for selecting personal protective equipment for arc flash hazards and the methods for minimize it such as arc flash detecting relays, zone selective interlocking or clearing time reduction.

---

\*\*\* Degree Project

\*\*\*\* School of Electrical Engineering. Hermann Raúl Vargas Torres.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. Objetivos . . . . .	21
1.2. Antecedentes . . . . .	22
1.3. Estructura del documento . . . . .	23
1.4. Planteamiento del problema . . . . .	24
<b>2. Arco eléctrico</b>	<b>25</b>
2.1. Introducción . . . . .	25
2.2. Iniciación del arco eléctrico . . . . .	25
2.2.1. Factores que inciden en la iniciación del arco eléctrico . . . . .	25
2.2.2. Efectos del aislamiento de los barrajes en la formación del arco . . . . .	26
2.3. Liberación de la energía del arco . . . . .	27
2.3.1. El arco eléctrico como fuente de calor . . . . .	27
2.3.2. El arco como fuente de ruido . . . . .	28
2.3.3. Arco como fuente de onda de presión . . . . .	30
2.3.4. Riesgo por explosión de materiales fundidos . . . . .	31
2.4. Efectos de la exposición a la temperatura del arco en tejidos humanos . . . . .	32
2.4.1. Lesiones en los tejidos generados ante el flameo por arco . . . . .	33
<b>3. Procedimientos y métodos de seguridad</b>	<b>36</b>
3.1. Introducción . . . . .	36
3.2. Método seguro de los seis pasos . . . . .	36
3.3. Panoramas de riesgo . . . . .	37
3.4. Trabajos en circuitos energizados o desenergizados . . . . .	38

3.4.1.	Árbol de decisión de trabajos en circuitos energizados . . . . .	38
3.5.	Maniobra segura de equipos de control de potencia . . . . .	41
3.5.1.	Operación de celdas de media tensión . . . . .	42
3.5.2.	Operación de celdas de baja tensión . . . . .	47
3.5.3.	Operación de interruptores en caja moldeada y paneles . . . . .	51
3.5.4.	Operación de interruptores encapsulados y de desconectores . . . . .	53
3.5.5.	Operación de arrancadores de motores . . . . .	55
<b>4.</b>	<b>Análisis de riesgo ante flameo por arco</b>	<b>58</b>
4.1.	Introducción . . . . .	58
4.2.	Métodos de análisis ante flameo por arco . . . . .	59
4.2.1.	Método de la norma [IEEE 1584, 2002] . . . . .	59
4.2.1.1.	Cálculo de la corriente del arco . . . . .	60
4.2.1.2.	Cálculo de la energía incidente y límites de protección contra flameo . . . . .	61
4.2.1.3.	Ecuaciones de energía incidente y límite de protección contra flameo en interruptores automáticos de baja tensión . . . . .	66
4.2.2.	Método de la norma [NFPA 70E, 2004] . . . . .	68
4.2.2.1.	Cálculo del límite de protección contra flameo . . . . .	68
4.2.2.2.	Cálculos de energía incidente . . . . .	69
<b>5.</b>	<b>Métodos para la reducción de los riesgos del flameo por arco</b>	<b>72</b>
5.1.	Introducción . . . . .	72
5.2.	Métodos tradicionales . . . . .	72
5.2.1.	Reducción de la corriente de arco . . . . .	72
5.2.2.	Bloqueo selectivo de zona (ZSI) . . . . .	73
5.2.3.	Coordinación de los tiempos de despeje de las protecciones eléctricas	74
5.2.4.	Aumento de la distancia de trabajo . . . . .	74
5.3.	Nuevas estrategias . . . . .	75
5.3.1.	Interruptores de mantenimiento . . . . .	76
5.3.2.	Respuesta a fallas de flameo por arco . . . . .	76
5.3.3.	La solución de la fibra óptica . . . . .	79

<b>6. Equipo de protección ante flameo por arco</b>	<b>83</b>
6.1. Introducción . . . . .	83
6.2. Descripción de elementos y equipos de protección ante flameo por arco . . .	83
6.2.1. Protección térmica y contra flameo . . . . .	83
6.2.1.1. Ropa resistente al flameo . . . . .	84
6.2.1.2. Trajes de protección contra flameo . . . . .	85
6.2.1.3. Cuidado y guía de uso de la ropa protectora . . . . .	85
6.2.2. Protección de cabeza y ojos . . . . .	87
6.2.2.1. Gafas de seguridad . . . . .	88
6.2.3. Protección de las manos . . . . .	88
6.2.3.1. Técnicas de inspección de guantes . . . . .	89
6.2.4. Herramientas aisladas . . . . .	90
6.2.5. Barreras temporales de advertencia . . . . .	90
6.2.6. Dispositivos de bloqueo y etiquetado . . . . .	91
6.2.6.1. Etiquetas de seguridad . . . . .	91
6.2.6.2. Dispositivos de bloqueo . . . . .	91
6.2.7. Pértigas aislantes . . . . .	93
6.2.7.1. Cuando usar las pértigas aislantes . . . . .	95
6.2.7.2. Formas de uso . . . . .	96
6.2.8. Señales de advertencia ante flameo por arco . . . . .	96
6.2.8.1. Requerimientos mínimos en el contenido de las señales de ad- vertencia . . . . .	97
6.2.8.2. Casos especiales en los símbolos de advertencia de riesgo de flameo por arco . . . . .	99
6.2.8.3. Cantidad de señales de advertencia de riesgo de flameo por arco	99
6.2.8.4. Impresión y aplicación de las señales de advertencia . . . . .	100
6.3. Selección de elementos de protección personal y ropa protectora . . . . .	103
6.3.1. Guía general y recomendaciones de uso . . . . .	104
6.3.2. Rendimiento de la ropa protectora resistente al flameo . . . . .	105
6.3.3. Sistemas de ropa con para-amidas y meta-aramidas . . . . .	106
6.3.4. Rendimiento de la ropa impermeable . . . . .	108

<b>7. Desarrollo de la herramienta software</b>	<b>110</b>
7.1. Introducción . . . . .	110
7.2. Metodología a seguir en el análisis de riesgo ante flameo por arco según la norma NFPA 70E . . . . .	110
7.3. Metodología a seguir en el análisis de riesgo ante flameo por arco según la norma IEEE 1584 . . . . .	112
7.4. Esquema del proceso . . . . .	114
7.4.1. Descripción del algoritmo empleado para realizar cálculos por [IEEE 1584, 2002]	114
7.4.2. Descripción del algoritmo empleado para realizar cálculos por [NFPA 70E, 2004]	119
7.5. Ejemplo tipo . . . . .	120
7.5.1. Estudio de cortocircuito . . . . .	120
7.5.2. Análisis de riesgo ante flameo por arco a corriente de falla plena . . .	120
7.5.3. Análisis de riesgo ante flameo por arco a corriente de falla reducida .	121
7.5.4. Análisis de los resultados . . . . .	124
<b>8. Implementación de un ejemplo de análisis de riesgo ante flameo por arco</b>	<b>126</b>
8.1. Introducción . . . . .	126
8.2. Recolección de los datos del sistema de potencia y la instalación . . . . .	126
8.2.1. Datos de los generadores de 1750 kVA . . . . .	126
8.2.2. Datos del generador de 5000 kVA . . . . .	127
8.2.3. Datos de los transformadores elevadores de 2500 kVA . . . . .	127
8.2.4. Datos del transformador elevador de 5000 kVA . . . . .	128
8.2.5. Datos del transformador de servicios auxiliares . . . . .	128
8.3. Diagrama unifilar . . . . .	128
8.4. Estudio de cortocircuito . . . . .	128
8.4.1. Cálculo de las corrientes de falla máximas y tiempos de despeje de los dispositivos de protección . . . . .	128
8.4.1.1. Falla trifásica en los barrajes de los generadores . . . . .	131
8.4.1.2. Falla trifásica en el barraje principal de 34,5 kV . . . . .	131
8.4.1.3. Falla trifásica en el barraje del centro de consumo . . . . .	131
8.4.1.4. Falla trifásica en el barraje de servicios auxiliares . . . . .	138

8.4.1.5. Corrientes máximas de falla y tiempos de despeje de los dispositivos de protección . . . . .	138
8.5. Análisis de riesgo ante flameo por arco . . . . .	138
8.5.1. Análisis de riesgo ante flameo por arco en las celdas de protección de los generadores de 1750 kVA . . . . .	138
8.5.2. Análisis de riesgo ante flameo por arco en las celdas de protección del generador de 5000 kVA . . . . .	144
8.5.3. Análisis de riesgo ante flameo por arco en el barraje de servicios auxiliares	147
8.5.4. Análisis de riesgo ante flameo por arco en el barraje de carga . . . . .	150
8.6. Análisis de resultados del estudio de análisis de riesgo ante flameo por arco .	156
8.7. Reducción del riesgo en las celdas de protección . . . . .	156
<b>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>160</b>
9.1. PARA TRABAJOS FUTUROS SE RECOMIENDA . . . . .	161
<b>Bibliografía</b>	<b>162</b>
<b>A. Distancias de seguridad</b>	<b>165</b>
A.1. Introducción . . . . .	165
A.2. Límites de aproximación . . . . .	165
<b>B. Manual del usuario</b>	<b>170</b>
B.1. Introducción . . . . .	170
B.2. Requerimientos . . . . .	170
B.3. Instalación . . . . .	170
B.4. Ejecución . . . . .	171
B.4.1. Ejecución inicial . . . . .	171
B.4.2. Selección del método de IEEE 1584 2002 para el cálculo de los parámetros	171
B.4.2.1. Selección de interruptores automáticos en caja moldeada .	173
B.4.2.2. Selección de fusibles . . . . .	176
B.4.2.3. No aplica ningún dispositivo de protección . . . . .	179
B.4.3. Selección del método de NFPA 70E para el cálculo de los parámetros	184

B.4.3.1. Para tensiones mayores o iguales a 600 V . . . . .	184
B.4.3.2. Para tensiones menores a 600 V . . . . .	186

**C. Tablas de referencia** **189**

C.1. Introducción . . . . .	189
C.2. Distancias típicas de trabajo en diferentes equipos . . . . .	189
C.3. Separación típica entre conductores . . . . .	189
C.4. Niveles de riesgo y requerimientos de la ropa de protección personal . . . . .	190

# Índice de figuras

2.1. Variación del pico de presión del sonido medido a 1,8 m . . . . .	29
2.2. Variación del pico de presión del sonido medido a 1,8 m . . . . .	30
2.3. Efecto de atenuación de la onda de sonido con un tejido de 254 g/m <sup>2</sup> a 1,8 m de la fuente de arco . . . . .	31
2.4. Oportunidades de sobrevivir a lesiones por quemaduras . . . . .	33
2.5. Relación tiempo exposición-temperatura, tolerancia de los tejidos humanos .	34
2.6. Estratos de la piel . . . . .	35
3.1. Árbol de decisión de trabajo en circuitos desenergizados . . . . .	39
3.2. Celda metálica de media tensión . . . . .	42
3.3. Interruptor usado en celdas de media tensión . . . . .	43
3.4. Interruptor automático de media tensión usado en celdas . . . . .	44
3.5. Palanca de maniobra con cremallera . . . . .	44
3.6. Celda con la puerta abierta donde se muestra el cubículo donde se ubica el interruptor automático . . . . .	45
3.7. Interruptor de potencia de baja tensión completamente separado del barraje	48
3.8. Interruptores automáticos de baja tensión usados en las celdas . . . . .	49
3.9. Celda de baja tensión . . . . .	50
3.10. Celda metálica de baja tensión . . . . .	50
3.11. Interruptor automático de caja moldeada . . . . .	52
3.12. Páneles equipados con interruptores automáticos en caja moldeada . . . . .	52
3.13. Tipos de interruptores encapsulados . . . . .	54
3.14. Arrancador de motor de baja tensión . . . . .	55
4.1. Característica tiempo - corriente de un interruptor automático . . . . .	68

5.1. Ajustes encontrados del dispositivo de protección . . . . .	74
5.2. Ajustes cambiados al dispositivo de protección . . . . .	75
5.3. Sistema de potencia analizado . . . . .	76
5.4. Resultados del análisis de riesgo a una distancia de 457,2 mm del punto de arco	77
5.5. Resultados del análisis de riesgo a una distancia de 1854,2 mm del punto de arco . . . . .	78
5.6. Distribución típica de la fibra óptica en tableros de distribución . . . . .	79
5.7. Diagrama de bloques de un relé con detección de arco . . . . .	80
5.8. Comparación de los tiempos de operación . . . . .	81
5.9. Disposición simple de fibra óptica . . . . .	81
5.10. Niveles de energía incidente con protección instantánea y de sobrecorriente de respaldo . . . . .	82
6.1. Traje de protección contra flameo en NOMEX con ATPV de 75 cal/cm <sup>2</sup> . . .	87
6.2. Gafas de protección . . . . .	89
6.3. Etiquetas usadas con los dispositivos de bloqueo . . . . .	92
6.4. Dispositivos multibloqueo . . . . .	93
6.5. Pértigas aislantes . . . . .	94
6.6. Detector de tensión unido a una pértiga aislante . . . . .	94
6.7. Secciones y herramientas de las pértigas . . . . .	95
6.8. Señales de advertencia según ANSI Z535.4 . . . . .	101
6.9. Señal de advertencia para la prevención de los accidentes de flameo por arco	101
6.10. Señal de advertencia para la prevención de accidentes de flameo por arco . .	102
7.1. Esquema del programa de cálculo de la energía incidente . . . . .	115
7.2. Esquema del sistema de potencia del ejemplo tipo . . . . .	120
7.3. Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla	122
7.4. Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección DP1 . . . . .	123
7.5. Datos de entrada y resultados del análisis para el 85 % de la corriente de falla	125
8.1. Diagrama unifilar del centro de generación . . . . .	129
8.2. Centro de generación montado en NEPLAN . . . . .	130
8.3. Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 1	132

8.4. Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra del generador 2	133
8.5. Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 3	134
8.6. Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 4	135
8.7. Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en el barraje principal de 34,5 kV . . . . .	136
8.8. Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra del centro de consumo . . . . .	137
8.9. Corriente y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra de servicios auxiliares . . . . .	139
8.10. Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla	141
8.11. Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección DP1 . . . . .	142
8.12. Datos de entrada y resultados del análisis para el 85 % de la corriente de falla	143
8.13. Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla	145
8.14. Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección PG4 . . . . .	146
8.15. Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla	148
8.16. Tiempo de despeje de la corriente de arco plena . . . . .	149
8.17. Tiempo de despeje de la corriente de arco reducida . . . . .	149
8.18. Datos de entrada y resultados del análisis . . . . .	151
8.19. Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla	152
8.20. Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección PCarga . . . . .	154
8.21. Datos de entrada y resultados del análisis para el 85 % de la corriente de falla	155
8.22. Ajustes realizados al dispositivo de protección de los generadores . . . . .	157
8.23. Ajustes encontrados en el dispositivo de protección de los generadores . . . . .	157
8.24. Análisis de riesgo después de realizada la coordinación del tiempo de despeje del dispositivo de protección . . . . .	159
A.1. Límites de aproximación . . . . .	166
B.1. Ventana de selección del método cálculo de los parámetros . . . . .	172
B.2. Ventana desplegada, para los cálculos en caso de selección de interruptores automáticos . . . . .	174
B.3. Ventana desplegada con los límites de corriente del modelo . . . . .	175
B.4. Ventana desplegada, para los cálculos en caso de selección de fusibles . . . . .	177

---

B.5. Mensaje de error desplegado . . . . .	178
B.6. Ventana desplegada, para los cálculos en caso no aplicar ningún dispositivo de protección, tensiones menores a 15 kV . . . . .	180
B.7. Ventana desplegada, para los cálculos en caso no aplicar ningún dispositivo de protección, tensiones mayores a 15 kV . . . . .	183
B.8. Ventana desplegada, para los cálculos a tensiones mayores o iguales a 600 V	185
B.9. Ventana desplegada, para los cálculos a tensiones menores a 600 V . . . . .	187

# Índice de tablas

2.1. Factores que inciden en las lesiones causadas por el arco eléctrico . . . . .	29
2.2. Resultados para dos tipos de protectores faciales de 100 cal/cm <sup>2</sup> de resistencia	31
2.3. Resultados balísticos para un protector multicapa de 80 cal/cm <sup>2</sup> y cuatro de 100 cal/cm <sup>2</sup> . . . . .	32
4.1. Exponente de distancia y separaciones típicas entre conductores, en diferentes configuraciones . . . . .	63
4.2. Dimensiones de las cajas usadas en las pruebas de laboratorio, para diferentes tipos de encerramientos . . . . .	63
4.3. Nivel de EPP calculado versus nivel de EPP medido, baja tensión . . . . .	64
4.4. Nivel de EPP calculado versus nivel de EPP medido, baja tensión . . . . .	64
4.5. Ecuaciones de energía incidente y límites de protección contra flameo para diferentes tipos de interruptores y rangos de corriente . . . . .	67
6.1. Propiedades relativas de varios tipos de tejidos . . . . .	86
6.2. Clases de guantes de protección . . . . .	89
6.3. Procedimientos típicos que requieren el uso de pértigas aislantes . . . . .	94
6.4. Energía incidente vs probabilidad de ignición en tejidos sin tratamientos . . . . .	104
6.5. Guía de la ropa protectora para flameos por arco . . . . .	106
6.6. Resultados típicos de pruebas de arco en sistemas de tejidos de meta-aramida de una sola capa . . . . .	107
6.7. Resultados típicos de pruebas de arco en sistemas de tejidos de meta-aramida de capas múltiples . . . . .	107
6.8. Resultados de las pruebas, de ropa impermeable que cumple con ASTM F1891- 99a . . . . .	108

---

6.9. Resultados de pruebas en ropa impermeable con una capa de tejido resistente al flameo . . . . .	109
8.1. Corrientes máximas de falla y tiempos de despeje de los dispositivos de protección	138
8.2. Resumen de los resultados del análisis de riesgo ante flameo por arco en el centro de generación . . . . .	156
A.1. Límites de aproximación a partes energizadas expuestas para prevenir electrocución . . . . .	167
C.1. Distancias típicas de trabajo en diferentes equipos . . . . .	189
C.2. Separación típica entre conductores de diferentes fases . . . . .	190
C.3. Niveles de riesgo y requerimientos de la ropa de protección personal . . . . .	190

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de grado es dar una guía para minimizar el riesgo debido al flameo por arco en sistemas eléctricos.

Para el cumplimiento de este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las exigencias necesarias, para alcanzar una condición de trabajo eléctricamente segura y describir los procesos y dispositivos de bloqueo/etiquetado como herramienta necesaria para alcanzar esta condición.
- Definir los procedimientos generales para la realización segura de trabajos cerca o con elementos energizados.
- Revisar los métodos para el cálculo de la distancia límite de protección contra flameo, con el fin de establecer los requerimientos de los elementos de protección personal y la ropa protectora, cuando se realizan actividades dentro de estos límites.
- Identificar las actividades de mantenimiento requeridas en equipos e instalaciones eléctricas, enfocadas a la seguridad, a las cuales se deben ajustar los métodos específicos de mantenimiento en los lugares de trabajo.
- Revisar los cálculos y técnicas utilizadas por las normas [NFPA 70E, 2004] y la [IEEE 1584, 2002] para determinar las distancias de riesgo de flameo por arco y la energía incidente a la cual el personal está expuesto durante el trabajo cerca o en las instalaciones y equipos eléctricos energizados.
- Elaborar una herramienta software, que reuna lo relacionado en las normas [NFPA 70E, 2004] e [IEEE 1584, 2002] con los cálculos para determinar los límites de

flameo por arco, energía incidente y requerimientos de los elementos de protección personal.

## 1.2. Antecedentes

Existen diversos artículos que precedieron a la normativa actual [IEEE 1584, 2002] y [NFPA 70E, 2004] que permitieron el desarrollo de las bases para cuantificar el riesgo ante flameo por arco. Entre estos estudios se tienen algunos que se mencionan a continuación:

En [Kaufmann y otro, 1960], se definen métodos de protección contra fallas por arco en sistemas de potencia de distribución de baja tensión. Este artículo identificaba las lesiones potenciales debidas a fallas por arco eléctrico, causadas por herramientas en contacto con barrajes sin aislamiento, roedores, fallas de aislamiento o conexiones sueltas. Se enfocaba en la naturaleza de las fallas por arco, los elementos de protección y esquemas de protección que podrían ser usados para extinguir el arco.

En [Stanback, 1977], se busca estimar el daño producido por fallas monofásicas a tierra, en sistemas de 277 V. Este artículo presenta un método para estimar el grado de las quemaduras producidas por elementos metálicos derretidos, que se esperan a diferentes magnitudes de corriente de arco. Además, da recomendaciones sobre la coordinación de los dispositivos de protección, dirigidas a la disminución del riesgo.

En [Lee, 1982], el otro riesgo eléctrico: quemaduras por explosiones por arco eléctrico, se resaltaba el riesgo por flameo por arco. Se describen las explosiones por arco eléctrico como el otro riesgo eléctrico. El riesgo térmico se describe para quemaduras de segundo grado a 10' (3,05 m) del punto de arco y quemaduras de tercer grado a 5' (1,5 m) del punto de arco. Presenta también métodos teóricos para la evaluación del riesgo por arco eléctrico al aire libre y da información acerca de las medidas de prevención que se deben tomar para evitar daños serios.

En [Dunki-Jacobs, 1986], se describe el fenómeno de migración de la falla a tierra por arco, las posibles consecuencias de las fallas a tierra se describen en este artículo. Explica el fenómeno de como las fallas fase a tierra en baja tensión pueden migrar a fallas trifásicas. Se analiza el hecho de que la corriente de arco sea considerablemente menor que la corriente de falla de contacto en equipos de 480 V. Se describen las situaciones en las que el arco se puede volver autosostenible.

En [Doughty y otros, 2000], se presenta un método para la estimación de la energía incidente

en sistemas trifásicos de distribución de potencia de 600 V. El efecto de la energía incidente del arco en encerramientos cúbicos fué considerada en el desarrollo de las ecuaciones para la estimación de las corrientes de falla de contacto a varias distancias. Se plantean los beneficios de usar la estimación de la energía incidente en el manejo del riesgo eléctrico por arco.

En [Heberlein y otros, 1996], reporta pruebas con arcos eléctricos en encerramientos. Este artículo se enfoca en fallas por arco de alta energía en encerramientos con las puertas cerradas. Da los resultados de pruebas en centros de control de motores de 600 V. Se identifica la necesidad de normas en equipos de prueba de baja tensión.

En [Jones y otros, 1995], se discuten los riesgos del flameo por arco en diferentes niveles de un sistema eléctrico. Este artículo presenta información sobre una instalación petroquímica donde se usa protección contra flameo, se enfoca en el efecto de los arcos eléctricos de alta energía en humanos y presenta los cálculos de las distancias para las cuales las lesiones por quemaduras son curables.

## 1.3. Estructura del documento

La presentación de este libro se realiza en nueve capítulos.

### Capítulo 2

Se describe el fenómeno de flameo por arco y las causas que lo pueden generar. Se explican las diferentes formas de liberación de la energía del arco, además de las consecuencias sobre los tejidos de los seres humanos.

### Capítulo 3

Contiene los procedimientos generales necesarios en el desarrollo de cualquier tarea eléctrica, para establecer una condición segura del trabajo. Establece una guía para la realización de trabajos sobre conductores eléctricos energizados.

### Capítulo 4

Se describen los cálculos necesarios para llevar a cabo un análisis de riesgo ante flameo por arco, mediante el uso de las normas [NFPA 70E, 2004] y [IEEE 1584, 2002].

### Capítulo 5

Se describen los métodos técnicos como coordinación de protecciones y nuevos dispositivos para disminuir los riesgos por flameo por arco.

### Capítulo 6

Enumera diferentes equipos de protección personal usados para mitigar los riesgos por flameo por arco, tales como pértigas, guantes, cascos, ropa resistente al flameo, además de algunas

técnicas de inspección de estos equipos en busca de daños que puedan afectar su rendimiento. Hace énfasis en la importancia del uso de dispositivos de bloqueo/etiquetado en la protección del personal. Además se explica la selección de la ropa protectora con base en los cálculos de energía incidente.

### **Capítulo 7**

Describe la herramienta en Matlab que realiza los cálculos necesarios para el estudio de flameo por arco.

### **Capítulo 8**

Muestra los pasos a seguir en la implementación de un estudio de análisis de los riesgos ante flameo por arco.

### **Capítulo 9**

Este capítulo se presentan las conclusiones y se dan las recomendaciones para trabajos futuros.

## **1.4. Planteamiento del problema**

En el sector industrial, gran número de empleados sufren graves accidentes o mueren electrocutados a través de contacto directo o indirecto con elementos eléctricos energizados. Sin embargo, existe otra causa, el flameo por arco eléctrico. El flameo por arco eléctrico es básicamente un cortocircuito a través del aire. En un accidente de flameo por arco eléctrico, ocurre una explosión de energía que se manifiesta como ondas de presión y gas caliente a temperaturas extremadamente altas, que causa quemaduras severas que pueden ser fatales. En promedio un accidente relacionado con flameo por arco ha ocurrido cada 18 meses durante los últimos 54 años [IEEE 1584, 2002].

Debido a la actual regulación del sistema eléctrico, las empresas del sector se están viendo avocadas a la búsqueda y mejoramiento de los programas de seguridad eléctrica. Muchas empresas no cuentan aún con programas de seguridad o los que tienen son inadecuados. De esta situación nace la necesidad de mejorar los programas de seguridad existentes, empleando como herramienta el análisis de riesgo ante al flameo por arco, mediante el cual se pueden escoger diferentes métodos para mitigar sus riesgos.

# Capítulo 2

## Arco eléctrico

### 2.1. Introducción

Todas las personas conocen los riesgos que involucra el contacto directo con circuitos eléctricos energizados. Muchos trabajadores en el sector eléctrico han recibido este tipo de descargas y como consecuencia, este riesgo se ha mantenido muy presente en cuanto a la toma de medidas dirigidas a su disminución. Sin embargo, hay otro riesgo el cual no ha sido tan profundamente estudiado y donde no se necesita del contacto directo para que ocurra la lesión. Este es la radiación de calor y de ondas de presión proveniente del flameo por arco eléctrico, el cual lo inician cortocircuitos desarrollados por contactos eléctricos pobres o fallas en los aislamientos. Con una temperatura cercana a la del láser, la temperatura del arco supera por alrededor de cuatro veces, la de la superficie del sol.

En un arco que se involucren corrientes altas, las quemaduras pueden ser fatales incluso a varios centímetros de su origen. Debido a las altas temperaturas a distancias considerables la ropa se quema y si dicha ropa no es la adecuada, puede aumentar la gravedad de las lesiones. Estos factores unidos al hecho de que los tejidos humanos son muy sensibles a los aumentos de temperatura, han dirigido la atención de muchos científicos al estudio del fenómeno de la liberación de la energía del arco, de los factores que lo puedan iniciar y sus posibles consecuencias sobre los tejidos humanos, siendo este conocimiento el primer paso en la prevención de los riesgos asociados con dicha liberación energética.

### 2.2. Iniciación del arco eléctrico

#### 2.2.1. Factores que inciden en la iniciación del arco eléctrico

El arco eléctrico puede ser iniciado de varias formas [Dunki-Jacobs, 1986]:

- Deslizamiento de las herramientas del electricista (ocasionando contacto accidental con la parte energizada), disminución de la distancia de tensión disruptiva.
- Conexiones sueltas, que causan sobre calentamientos y formaciones menores de arcos, las cuales durante un periodo largo de tiempo pueden empeorar e ionizar el aire lo suficiente para causar un arco espontáneo a tierra o a otra fase.
- Falla en el aislamiento debida a conducción por polvo conductivo en la superficie del aislador o por rupturas en el cuerpo del aislador.
- Los gases conductores que son emanados de interruptores automáticos o fusibles durante la interrupción del circuito. Si estos gases se dirigieran hacia conductores energizados desnudos después de la interrupción, se podría crear una falla a tierra o fase-fase.
- Falla en la interrupción de un cortocircuito, por un interruptor automático o un fusible.
- Presencia de animales, especialmente aquellos que retornan de una zona húmeda, que puedan aumentar la humedad y por lo tanto disminuir la rigidez dieléctrica del aire.

El disparo inicial del arco eléctrico no necesariamente puede producir graves consecuencias, de hecho, es posible que bajo ciertas condiciones físicas y de operación específicas, el arco se auto-extinga sin que su presencia se haga evidente. Sin embargo, bajo otras circunstancias, el arco se puede volver autosostenido y por lo tanto se hace necesario que los dispositivos de protección operen efectivamente, limitando el daño potencial que la falla por arco pueda generar. En la condición en la que el arco es autosostenible, si el arco fué iniciado por una falla monofásica puede que continúe como arco por falla monofásica, o escalar a un arco por falla trifásica.

### **2.2.2. Efectos del aislamiento de los barrajes en la formación del arco**

Si una falla monofásica que genere un arco, se inicia en la proximidad de tres barrajes desnudos en un encerramiento metálico, es de esperarse que los gases calientes ionizados causen la falla en las otras barras y por tanto el escalamiento a una falla trifásica, en alrededor de 1 o 2 ciclos de tiempo, lo que hará que las protecciones a tierra no operen. Los encargados de desenergizar la falla, serán entonces, los dispositivos de protección por sobrecorriente de fase, mucho menos sensibles y mas lentos. El daño resultante de este tipo de arcos puede ser muy severo. De lo contrario, si una falla monofásica que genere arco se inicia en la proximidad

de tres barras aisladas, como por ejemplo en una celda de media tensión, se espera que la falla continúe siendo monofásica y que el dispositivo de protección opere rápidamente, removiendo el equipo de la fuente de potencia. Las ventajas de las barras aisladas se hacen de inmediato evidentes con esta observación. Se debe tener en cuenta que las fallas por arco, tienen probabilidad de ocurrir cuando las propiedades de aislamiento del aire han sido degradadas. Por lo tanto, no es de esperar que una falla por arco ocurra en aislamientos sólidos, como los de los devanados de un motor incrustados en las ranuras de un rotor. En tales casos si el degradamiento (carbonización) del aislamiento causa una falla a tierra, la cual no es de naturaleza similar a la del arco (el material aislante carbonizado termina convirtiéndose finalmente en un semiconductor). Cuando el aislamiento de cables instalados en tubería falla, la falla resultante se puede atribuir a la degradación gradual del aislamiento, la que con el tiempo puede escalar a una falla por arco del conductor desnudo a tierra a través del aire.

## 2.3. Liberación de la energía del arco

### 2.3.1. El arco eléctrico como fuente de calor

El arco eléctrico es el flujo de corriente a través de un camino formado por materiales de los terminales que han sido vaporizados debido a las altas temperaturas. Este vapor tiene una resistencia mas alta que el metal sólido, las caídas de tensión en un arco están en el rango de 75 a 100 V/pulg (29 a 39 V/cm). El camino del arco es de naturaleza principalmente resistiva. El arco eléctrico es ampliamente reconocido como una fuente de calor, la temperatura en los terminales metálicos entre los que se forma son extraordinariamente altos. Se han reportado temperaturas de 20000 K a 34000 K, inclusive ciertos tipos de arco pueden generar temperaturas hasta de 50000 K. La única temperatura mas alta conocida en la tierra es la del láser, la cual puede llegar a los 100000 K. La parte intermedia del arco entre las partes conductoras, reporta temperaturas de 13000 K, en comparación, la superficie del sol tiene una temperatura aproximada de 5000 K.

La transferencia de calor, es una función de la diferencia de las temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia. la relación se muestra en la ecuación (2.1). [Lee, 1982]:

$$h = C \cdot 0,57(T_e^4 - T_a^4) \cdot 10^{-11} \quad (2.1)$$

$h$ : transferencia de calor  $W/cm^2$ .

$C$ : coeficiente de absorción de la superficie absorbente.

$T_e$ : temperatura absoluta de la superficie emisora.

$T_a$ : temperatura absoluta de la superficie absorbente.

Y el calor recibido por unidad de área se relaciona por la ecuación (2.2).

$$Q_0 = \frac{Q_s \cdot A_s}{4\pi r^2} \cdot A_0 \quad (2.2)$$

$Q_s$ : calor emitido de la fuente por unidad de área  $W$ .

$A_s$ : área total de superficie de la fuente.

$r$ : distancia del centro de la fuente al objeto.

$A_0$ : superficie de área proyectada del objeto, a lo largo de un plano normal a la dirección fuente a objeto.

En la tabla 2.1 se observan los factores que inciden en la gravedad de las lesiones producidas ante el flameo por arco

### 2.3.2. El arco como fuente de ruido

Una serie de arcos eléctricos fueron monitoreados con micrófonos, en orden de establecer un entendimiento del riesgo originado por el ruido y la relación entre los parámetros del arco y los niveles de ruido [Neal y otro, 2005]. Mediciones de niveles de sónico producidos por varios arcos trifásicos, se presentan en las figuras 2.1 y 2.2. La figura 2.1 muestra como los niveles de ruido aumentan con el aumento de la corriente de falla, aunque en las pruebas realizadas no se midió el nivel de ruido generado en arcos monofásicos, se espera un comportamiento similar para este tipo de arcos. La relación entre el pico de presión de sonido y la corriente de arco promedio, muestra una elevada variación, como se ve en la figura 2.1, esta variación se debe a las condiciones en las que se realizaron las pruebas. Si se tomaran medidas en una configuración fija se esperaría una reducción de la variación.

Tabla 2.1: Factores que inciden en las lesiones causadas por el arco eléctrico

Distancia	El daño generado por un arco disminuye con el cuadrado de la distancia
Temperatura	La energía es proporcional a la diferencia de temperaturas del arco y el cuerpo a la cuarta potencia
Tiempo	La energía recibida es proporcional al tiempo de exposición al arco
Coefficiente de absorción	La relación entre la energía recibida y la absorbida por el cuerpo
Área transversal	A mayor cantidad de área mayor cantidad de energía recibida
Ángulo de la energía	La energía recibida es proporcional al seno del ángulo de incidencia de la energía

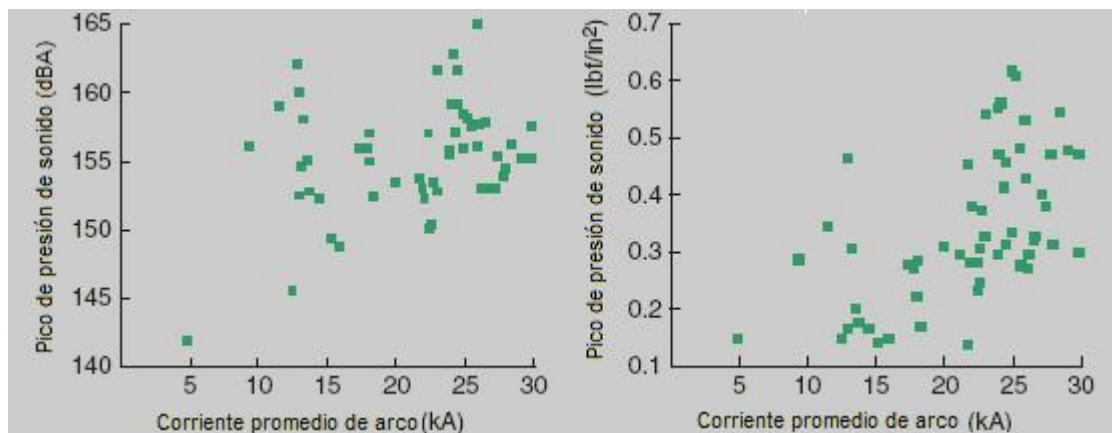


Figura 2.1: Variación del pico de presión del sonido medido a 1,8 m  
Fuente: IEEE industry applications magazine, mayo 2005

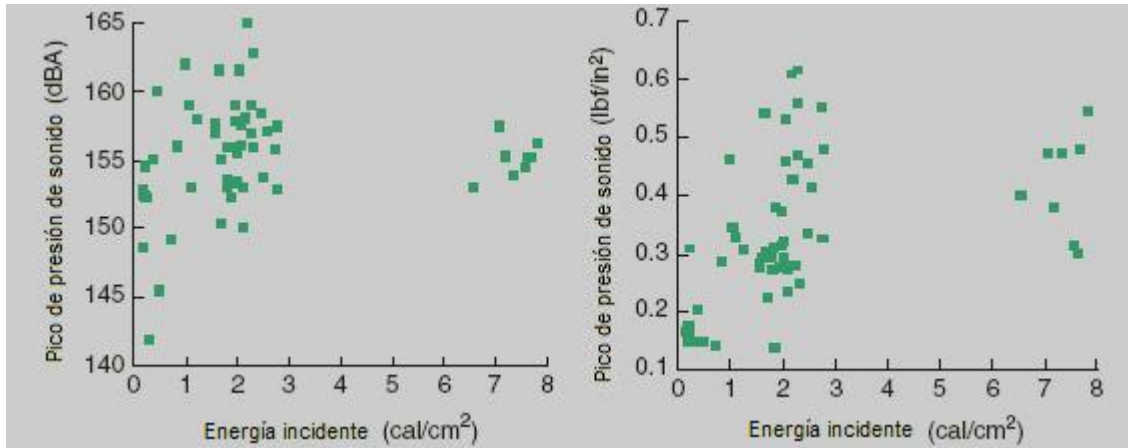


Figura 2.2: Variación del pico de presión del sonido medido a 1,8 m  
Fuente: IEEE industry applications magazine, mayo 2005

En la figura 2.2 se observa la variación del nivel de sonido, debida a la energía térmica incidente. Como se puede observar, hay una carencia de dependencia entre el nivel de ruido, la distancia al punto posible de arco y el tiempo de duración del arco.

La anterior falta de dependencia se puede explicar con el siguiente ejemplo: para un arco trifásico en un encerramiento de 16 kA y duración de 60 ciclos, a una distancia de 46 cm, la energía incidente es  $40 \text{ cal/cm}^2$  ( $167,5 \text{ J/cm}^2$ ), el pico de sonido producido será de  $0,6 \text{ lbf/pulg}^2$  ( $4136,83 \text{ N/m}^2$ ), ahora para un arco trifásico en el mismo encerramiento pero de magnitud de 30 kA y con duración del arco de tan solo 6 ciclos, la energía incidente se reducirá a  $5,8 \text{ cal/cm}^2$  ( $24,28 \text{ J/cm}^2$ ), pero el pico de sonido será del doble al anterior, esta prueba demuestra la relación proporcional entre la onda de presión generada y la corriente de arco.

### 2.3.3. Arco como fuente de onda de presión

En la figura 2.3 se muestra la relación entre el pico de sonido y la onda de presión generada por el flameo por arco, a una distancia de 1,8 m del punto posible de arco.

La máxima presión de sonido observada fue  $0,6 \text{ lbf/pulg}^2$  ( $4136,83 \text{ N/m}^2$ ), la fuerza aproximada en  $0,186 \text{ m}^2$  de área expuesta de un trabajador será aproximadamente 770 N, esto será suficiente para proyectar al trabajador lejos del punto de arco y ocasionar lesiones debidas a caída o colisiones con el equipo del área.

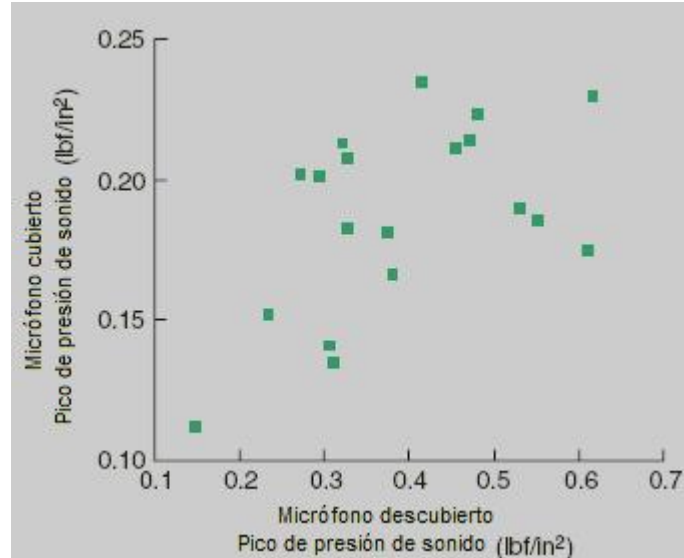


Figura 2.3: Efecto de atenuación de la onda de sonido con un tejido de  $254 \text{ g/m}^2$  a  $1,8 \text{ m}$  de la fuente de arco

Fuente: IEEE industry applications magazine, mayo 2005

Tabla 2.2: Resultados para dos tipos de protectores faciales de  $100 \text{ cal/cm}^2$  de resistencia

Resultados balísticos $V_{50}$ para el protector de la cara		
Protector ( $100 \text{ cal/cm}^2$ )	Diámetro (mm)	$V_{50}$ (m/s)
Policarbonato	5,6	>115
Policarbonato con ventana de seguridad	5,6	261

Fuente: IEEE industry applications magazine, mayo 2005

### 2.3.4. Riesgo por explosión de materiales fundidos

La norma ANSI Z87.1 especifica que un proyectil de acero de  $6,4 \text{ mm}$  de diámetro a una velocidad de  $91,4 \text{ m/s}$  no debe penetrar una capa protectora. Esta especificación no tiene en cuenta el rango de velocidades entre  $150 - 180 \text{ m/s}$  y las formas irregulares de los proyectiles, que se pueden presentar en un evento de flameo por arco. La tabla 2.2 provee resultados balísticos para dos protectores faciales de  $100 \text{ cal/cm}^2$ . La  $V_{50}$  balística es mostrada para proyectiles de  $5,6 \text{ mm}$  de diámetro,  $V_{50}$  es la velocidad a la cual el  $50\%$  de los proyectiles penetrarán el objetivo [Neal y otro, 2005].

La tabla 2.3 provee resultados balísticos para un protector multicapa de  $80 \text{ cal/cm}^2$  y cuatro de  $100 \text{ cal/cm}^2$ .

Tabla 2.3: Resultados balísticos para un protector multicapa de 80 cal/cm<sup>2</sup> y cuatro de 100 cal/cm<sup>2</sup>

RESULTADOS BALÍSTICOS V <sub>50</sub> PARA DIFERENTES SISTEMAS DE PROTECCIÓN			
Rango de protección (cal/cm <sup>2</sup> )	peso(g/m <sup>2</sup> )	V <sub>50</sub> (m/s)	Diámetro(mm)
Algodón RF (100 cal/cm <sup>2</sup> ), sin capa balística	1424	>115	5,6
Sistema aramida sin capa balística	932	261	5,6
Sistema aramida con capa balística	780	262	5,6
Sistema con aramida sin capa balística	881	263	7,8
Sistema con aramida con capa balística	922	264	7,8

Fuente: IEEE industry applications magazine, mayo 2005

## 2.4. Efectos de la exposición a la temperatura del arco en tejidos humanos

Las quemaduras se clasifican según su gravedad dentro de las tres categorías clásicas:

- Quemaduras de primer grado. Trauma causado a las capas exteriores de la piel. El daño permanente que puede resultar de este tipo de quemaduras es pequeño. La cicatrización es rápida.
- Quemaduras de segundo grado. Daño severo de los tejidos. Si la quemadura es en la piel, la capa exterior en su totalidad será destruida. La cicatrización ocurre desde las glándulas sudoríparas o los folículos del cabello
- Quemaduras de tercer grado. Destrucción completa del tejido, la cicatrización empezará desde los límites con la piel que no haya sido dañada tan severamente. Si el área de la piel quemada es muy grande se requerirá de transplante de tejido. Gran número de quemaduras de segundo y tercer grado son el resultado de la energía radiante del arco eléctrico, estas quemaduras ocurren frecuentemente sin contacto directo. El área total de la piel quemada es el factor clave en la supervivencia de las víctimas según datos de la figura 2.4 basados en un estudio de ABA (American Burn Association 1991-1993) [Doughty y otros, 2000].

El humano solo puede sobrevivir dentro de un rango cercano al valor de temperatura de la sangre 36,5°C, muy por encima de este nivel de temperatura, se requiere de ropa aisladora de calor y en valores por encima pero cercanos esta temperatura el calor se compensa con la transpiración. Se ha demostrado que a una temperatura en la piel de 44 °C por mas de 6 horas, el mecanismo de equilibrio de temperatura del cuerpo empieza a fallar, por lo tanto

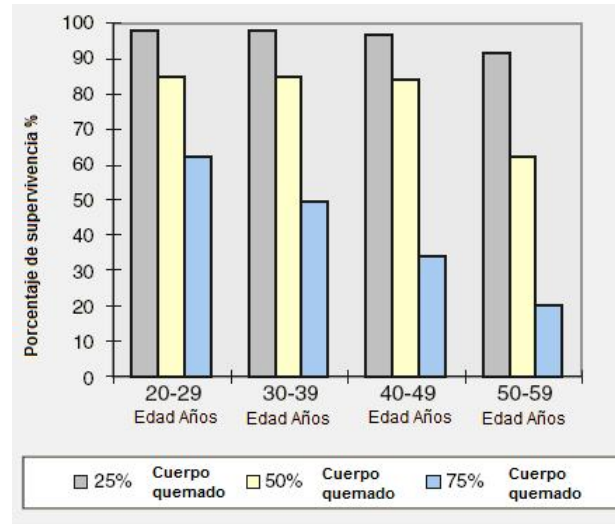


Figura 2.4: Oportunidades de sobrevivir a lesiones por quemaduras

Fuente: Minimizing burn injury, IEEE industry applications magazine, mayo 2002

el daño celular puede ocurrir a más de seis horas de exposición a esa temperatura. Entre 44 °C y 51 °C el daño celular se comienza a duplicar por cada 1°C de aumento. A temperaturas superiores a 51 °C el daño celular ocurre muy rápidamente y a 70 °C con solo un segundo de duración se puede causar destrucción celular total. La figura 2.5 muestra la relación entre la temperatura de la piel y el tiempo de exposición a la misma, la línea superior es el límite al que ocurre muerte celular (piel no curable), la línea más baja muestra los límites para las quemaduras curables [Lee, 1982].

La exposición de la piel durante 0,1 s a una temperatura por encima de los 96 °C, representa la destrucción total del tejido, solamente por debajo de 80 °C, durante ese tiempo la quemadura puede ser curable.

### 2.4.1. Lesiones en los tejidos generados ante el flameo por arco

La piel es la capa exterior que envuelve y encierra el cuerpo, el peso de la piel es aproximadamente de 4 lb (1,81 kg). En una pulg<sup>2</sup> (6,45 cm<sup>2</sup>) de piel hay hasta 50 glándulas sudoríparas, 20 vasos sanguíneos y más de 1000 terminaciones nerviosas. Este factor le da gran relevancia a las lesiones en la piel. En la figura 2.6 se muestran los diferentes estratos de la piel y las glándulas que contiene.

Las quemaduras por arco eléctrico se pueden producir de diferentes fuentes:

- Quemaduras por la radiación térmica proveniente de la energía incidente del arco eléctrico.

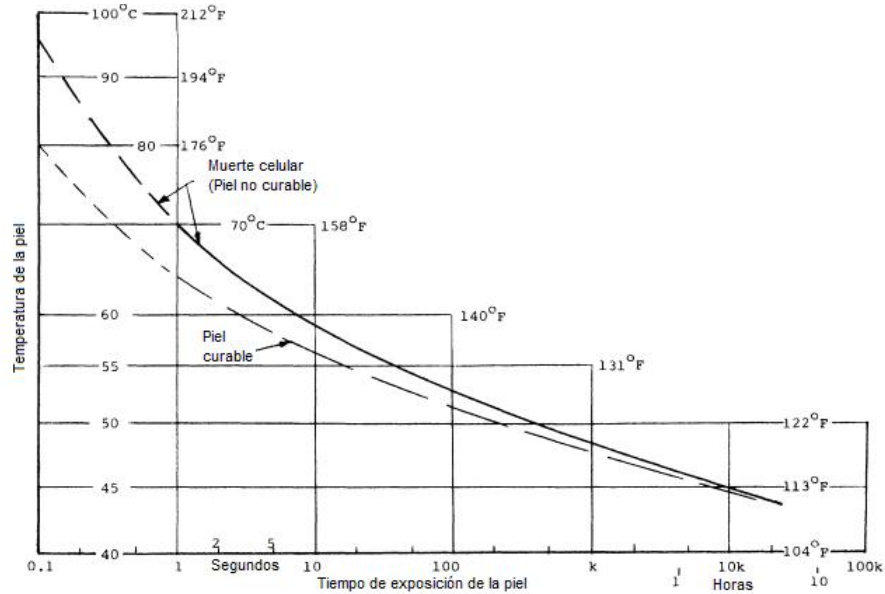


Figura 2.5: Relación tiempo exposición-temperatura, tolerancia de los tejidos humanos  
Fuente: Ralph Lee. The other electrical hazard: arc blast burns, 1982

- Contacto con el plasma supercaliente, causado por la vaporización de materiales sólidos en las proximidades de un arco eléctrico.

#### Otras lesiones

- Daño de terminales nerviosos debidos a quemaduras, puede generar pérdida de funciones motrices, de sensibilidad y/o parálisis.
- La intensidad luminosa del arco o los materiales fundidos expulsados, como resultado de este fenómeno puede causar disminución de la visión o ceguera.
- El ruido generado durante el flameo por arco puede causar pérdida parcial o total del oído.
- El plasma supercalentado puede ser inhalado causando quemaduras internas severas.
- Vapores metálicos pueden ser inhalados durante el flameo por arco, llenando los pulmones de residuos tóxicos.

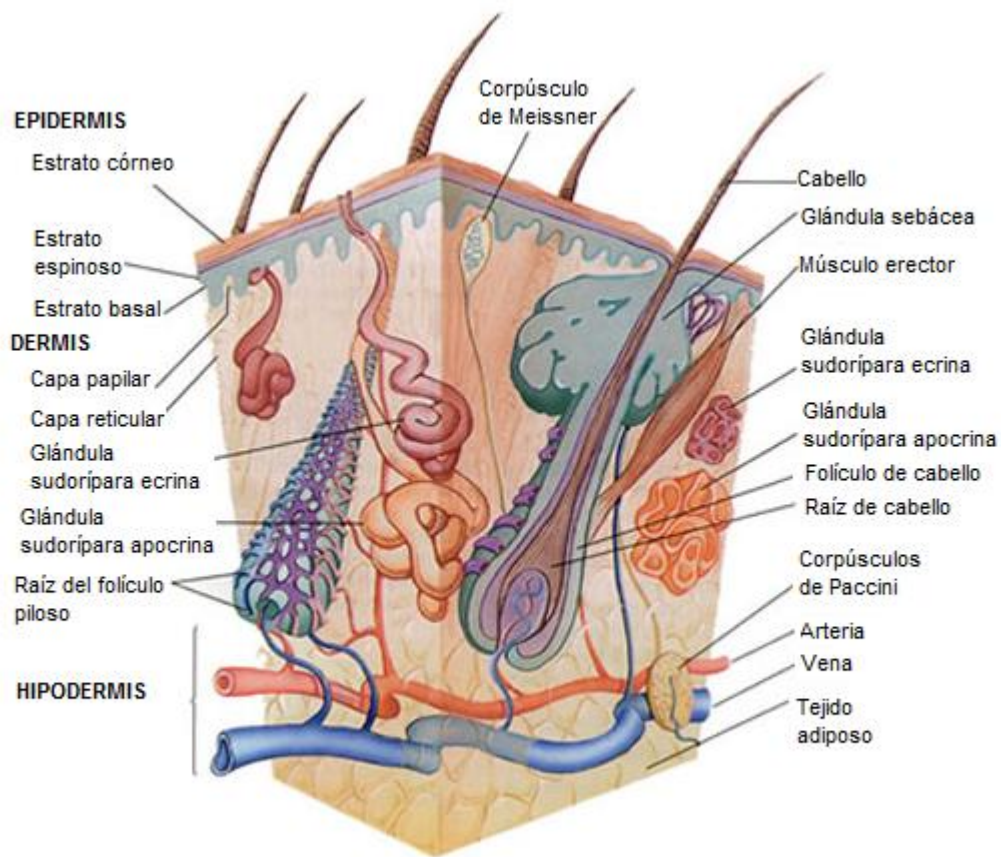


Figura 2.6: Estratos de la piel  
Fuente: University of Virginia. Health system

# Capítulo 3

## Procedimientos y métodos de seguridad

### 3.1. Introducción

La forma como se desarrollan trabajos eléctricos, es tan crítica como el equipo de seguridad que se use, cuando se está hablando de seguridad. La medición apropiada de la tensión, puede significar la diferencia entre la vida y la muerte. Permanecer en los sitios adecuados, durante operaciones de apertura o cierre de interruptores, puede mitigar los efectos del arco eléctrico y la explosión generada por este. La simple instalación de las puestas a tierra temporales, puede prevenir reenergizaciones accidentales que pudieran terminar en accidentes fatales. Esta sección resume las prácticas aceptadas por la industria y por la norma [NFPA 70E, 2004], para la ejecución de trabajos cerca o en circuitos eléctricos energizados. Se debe tener en cuenta que todos los procedimientos de seguridad, deben ser revisados como mínimo anualmente. El uso de equipos y procedimientos puede ser de ayuda, pero su uso adecuado por parte del trabajador, es lo que finalmente puede ayudar a disminuir los accidentes.

### 3.2. Método seguro de los seis pasos

Los siguientes son los seis pasos para prácticas seguras y sirven de base de la filosofía de seguridad personal. Cada individuo es responsable de su propia seguridad. En la siguiente lista se enumeran los pasos individuales que deben ser tomados por todo el personal que trabaje cerca o alrededor de circuitos y conductores eléctricos energizados [NFPA 70E, 2004].

1. Determine todas las fuentes posibles de suministro eléctrico para el equipo específico. Revise los diagramas unifilares actualizados.
2. Después de la apropiada interrupción de la corriente de carga, abra los dispositivos de desconexión para cada fuente.

3. Siempre que sea posible, verifique visualmente que todos los dispositivos de corte y protección, estén en la posición abierto.
4. Aplique los dispositivos de bloqueo/etiquetado de acuerdo con una política documentada y establecida.
5. Use un detector de tensión adecuado para la tensión en la que se esté trabajando y verifique que todas las fases o partes de un circuito estén desenergizados. Pruebe cada conductor o parte de circuito y verifique ausencia de tensión fase-fase y fase-tierra. Antes y después de cada prueba verifique que el detector opera satisfactoriamente.
6. Donde haya la posibilidad de tensiones inducidas o almacenamiento de energía, se deben aterrizar los conductores o partes eléctricas antes de tocarlos. Donde haya la posibilidad de contacto de las partes desenergizadas con otras partes energizadas, se deben aplicar dispositivos de conexión a tierra para el nivel de falla disponible.

### 3.3. Panoramas de riesgo

Es un documento en el cual se informa a los trabajadores de los requerimientos del trabajo. Particularmente, se emplea para prevenir a los trabajadores de los riesgos potenciales.

Según las normas OSHA se requiere que el panorama de riesgos incluya los temas:

- Precauciones especiales que se deben tomar.
- Riesgos asociados con el trabajo.
- Procedimientos de control de energía.
- Procedimientos y políticas.
- Equipo de protección personal.

Cuando se deben realizar los panoramas de riesgo:

- Al comienzo de cada turno de trabajo.
- Al comienzo de un tarea nueva.
- Cada vez que las condiciones de trabajo cambien.
- Cuando se requiera personal para la realización de trabajos en ejecución.

## 3.4. Trabajos en circuitos energizados o desenergizados

Toda la normativa de regulación sobre seguridad eléctrica, es clara en su requerimiento de desenergizar un circuito antes de la realización de trabajos en el mismo, por parte del personal. Se establece que todos los circuitos y sus componentes a los cuales los operadores puedan estar expuestos, se deben desenergizar antes de comenzar cualquier trabajo.

Unos puntos básicos clarifican este requerimiento.

- Disminución o pérdida de la producción nunca es una razón aceptable para permitir la realización de trabajos en circuitos energizados.
- Todo trabajo o tarea que se realice en circuitos energizados y que se pueda replantear, de forma que su ejecución se haga desenergizando el circuito, se debe llevar a cabo de esta manera.
- En los trabajos de reparación, se debe buscar en lo posible la desenergización de los circuitos.
- El empleado calificado que realiza el trabajo, debe tomar la decisión final de desenergizar o no el circuito, esta decisión debe estar libre de repercusiones por parte de la supervisión.

### 3.4.1. Árbol de decisión de trabajos en circuitos energizados

La figura 3.1 ilustra un método que puede ser empleado para determinar la necesidad de realización de trabajos en circuitos cuando estén energizados. Los números de la siguiente explicación corresponden con los números asignados a cada bloque de decisión mostrados en la figura 3.1 [Cadick y otros].

1. Los trabajos realizados cerca o en circuitos energizados de menos de 50 V a tierra se pueden considerar como trabajos en circuitos desenergizados. Tenga en cuenta que si el circuito tiene una alta capacidad de corriente de arco, la decisión 1 debe ser respondida como “Sí”.
2. Si la simple desenergización de un circuito, cambia el nivel de riesgo de un tipo a otro o si incrementa el grado actual de riesgo, esta decisión se debe responder como “Sí”. Los siguientes son ejemplos de riesgos adicionales que pueden influenciar esta decisión: (a) Interrupción de sistemas vitales, que mantengan con vida a las personas.

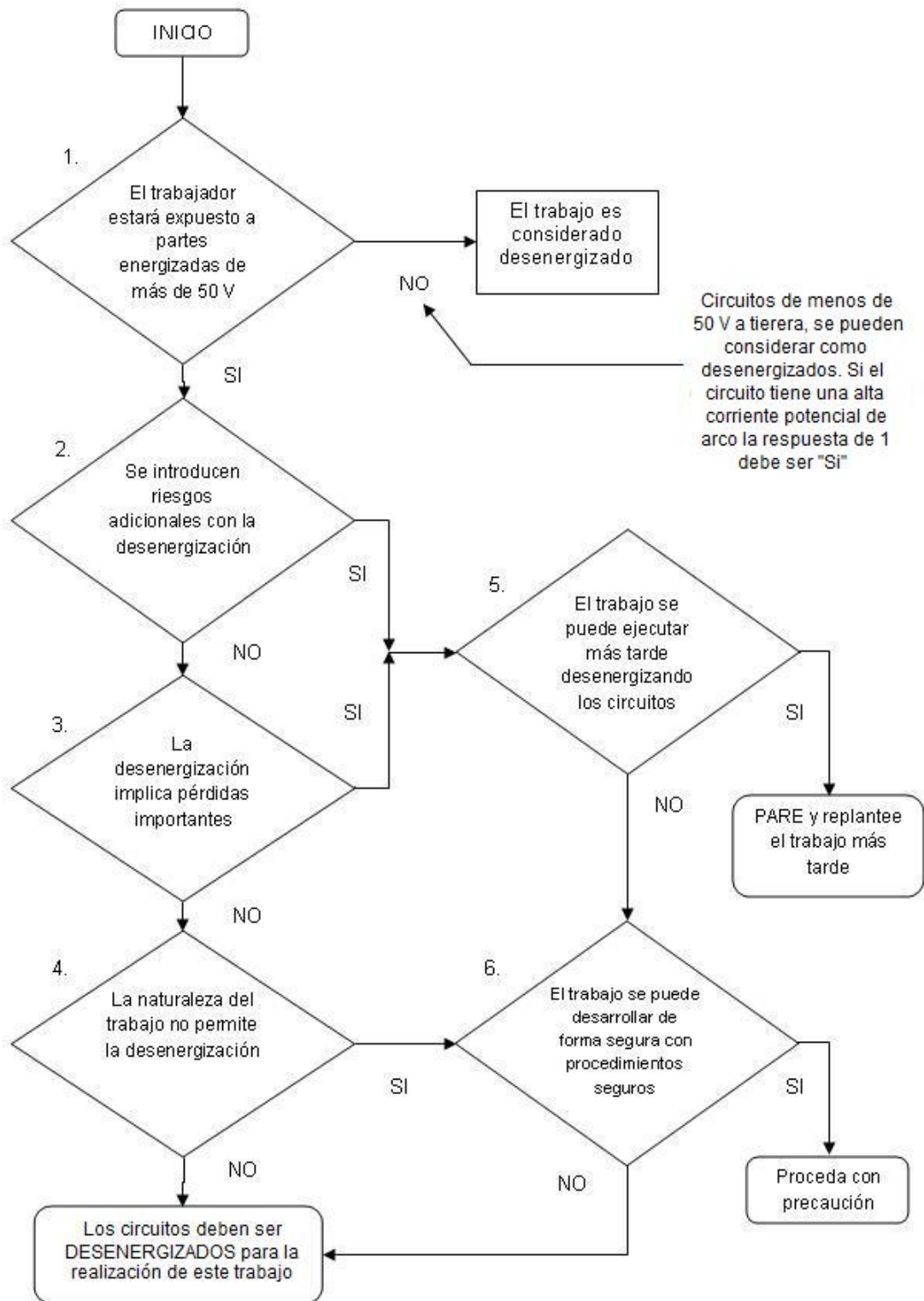


Figura 3.1: Árbol de decisión de trabajo en circuitos desenergizados  
Fuente: Electrical safety handbook

- (b) Desactivación de alarmas de emergencia. (c) Apagado de sistemas de ventilación en áreas de riesgo. (d) Apagado de sistemas de iluminación en áreas de trabajo.
3. La necesidad de mantener niveles de producción elevados es común a todas las industrias, las de manufactura, petroquímicas, de acero, del aluminio. Sin embargo muchas industrias pueden abusar de la necesidad de niveles de producción elevados. Los siguientes puntos ayudan a clarificar cuando la necesidad de producción puede influenciar la decisión de desenergización: (1) Caída de un proceso continuo que añadirá costos colaterales extraordinarios, puede ser tomado como una señal para permitir la ejecución de trabajo sobre el circuito energizado, por ejemplo: (a) Tiempos excesivos de reanudación en sistemas de procesos continuos. (b) Grandes pérdidas por interrupción de la producción (por ejemplo en la producción de polietileno).
  4. En algunos casos por la naturaleza del trabajo o del equipo, se requiere que los circuitos permanezcan energizados. Se debe tener en cuenta que si el trabajo se puede realizar con el circuito desenergizado, hágalo de esta forma. Por ejemplo, la reparación de un problema de un arrancador de un motor puede ser mas rápida con el circuito energizado, sin embargo se debe desenergizar, incluso si eso implica un costo adicional por pérdida de tiempo. Ejemplos de trabajos que no permiten la desenergización de los circuitos: (a) Realización de pruebas sobre circuitos eléctricos, pruebas de HIGHPOT o tangente delta por ejemplo. (b) Reparaciones complejas. (c) Búsqueda de puntos calientes con cámara de infrarrojos.
  5. Si las decisiones en (2) o (3) apuntan en la dirección de la realización del trabajo con el circuito energizado, la próxima decisión debe ser replanteada. Si el trabajo que ahora se está haciendo sobre un circuito energizado, en un turno posterior o más adelante se puede hacer desenergizando el circuito, debe ser pospuesto. Muchas compañías olvidan esta alternativa simple, exponiendo a sus trabajadores a los riesgos de la energía eléctrica.
  6. La final y mas importante de las decisiones, es determinar si el trabajo puede ser hecho de forma segura. Si en opinión del personal calificado el trabajo simplemente es muy peligroso para hacerlo con los circuitos energizados, entonces estos se deben desenergizar.

**Después que la decisión está tomada**

Si el trabajo se va a realizar sobre el circuito energizado, todos los operadores que trabajen cerca o con circuitos energizados, deben:

- Estar calificados para la realización del trabajo.
- Usar los elementos de protección adecuados.
- Seguir las prácticas apropiadas de trabajo seguras.

Pasos requeridos antes de comenzar trabajos sobre circuitos desenergizados

1. Todos los dispositivos de control de energía que estén alimentando el área de trabajo deben estar abiertos.
2. Se deben poner dispositivos de bloqueo/etiquetado, en todos los dispositivos de control de energía.
3. Las mediciones de tensión se deben tomar en los puntos de exposición para verificar que el circuito esté desenergizado.
4. Se deben instalar puestas a tierra de seguridad, para garantizar la existencia de una zona de trabajo equipotencial.
5. El área de trabajo deber ser inspeccionada cuidadosamente por personal calificado, para garantizar que los circuitos estén desenergizados.

### **3.5. Maniobra segura de equipos de control de potencia**

El procedimiento de seguridad mas básico es desenergizar las partes del sistema a las cuales los trabajadores puedan estar expuestos. Este procedimiento elimina los riesgos. El proceso de desenergización envuelve mas que un simple apagado de los interruptores. Para garantizar máxima seguridad, los procesos de desenergización que se precisen para cada situación deben ser documentados. En esta sección se plantean las técnicas adecuadas de seguridad, para la operación de varios tipos de equipos y los procedimientos de desenergización, reenergización, los cuales pueden ser usados como base para el desarrollo de procedimientos específicos en sitio. Los procedimientos específicos pueden variar, dependiendo de la aplicación y el tipo de equipo. Se debe recurrir al fabricante y/o a los procedimientos locales, para información específica. Los métodos aquí expuestos, se deben considerar como requerimientos mínimos.



Figura 3.2: Celda metálica de media tensión  
Fuente: Electrical safety handbook

Estos procedimientos asumen que el dispositivo está siendo operado cuando uno o ambos lados están energizados.

Se deben tener las siguientes precauciones:

- La maniobra de circuitos eléctricos debe ser llevada a cabo únicamente por personal calificado, que esté familiarizado con el equipo y entrenado para reconocer y evitar los riesgos de seguridad asociados con ese equipo.
- Los equipos que no sean diseñados para operar bajo carga, nunca deben ser usados para interrumpir el flujo de corriente.

**Operación remota.** Los procedimientos aquí descritos proveen prácticas reconocidas de trabajo seguro, en la operación manual de varios tipos de celdas. Se debe tener en cuenta que la mejor manera de operar cualquier tipo de dispositivo eléctrico, es hacerlo de manera remota. Si el equipo tiene supervisión u otro tipo de control remoto, debe ser operado siempre desde la posición remota, y todo el personal fuera de la zona de riesgo.

### 3.5.1. Operación de celdas de media tensión

Las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 muestran varios tipos de celdas de media tensión y los interruptores empleados por ellas. En este tipo de celdas el interruptor se desliza dentro de ellas mediante unas ruedas mostradas en la figura 3.3 o mediante un mecanismo de traslado, de



Figura 3.3: Interruptor usado en celdas de media tensión  
 Fuente: VD4 interruptores en vacío de media tensión, catálogo ABB

tipo deslizante, como el mostrado en el lado derecho de la figura 3.4. La apertura y cierre del interruptor se realiza eléctricamente, usando una manija o un botón, montado en el panel frontal. Al girarlo en una dirección, por lo general en el sentido de las agujas del reloj, el interruptor se abre y en la dirección contraria se cierra. El interruptor se conecta a la línea y al barraje por medio de un juego de desconectores, visibles en la parte superior de la figura 3.3 o en el lado derecho de la figura 3.4. Cuando el interruptor está abierto, se puede mover hacia el frente del cubículo y por lo tanto desconectarlo del barraje y de la línea. Esta acción hace referencia al traslado del interruptor. El interruptor puede ser completamente removido de la celda o puede ser puesto en dos o más posiciones auxiliares. En el traslado de los interruptores se usan palancas de maniobra con cremallera, ver figura 3.5.

La mayoría de los celdas tienen dos posiciones auxiliares: la posición de prueba y la de desconexión, en la posición de prueba el interruptor se desconecta del barraje, por lo tanto el control de potencia sigue siendo llevado a cabo por el juego de desconectores secundarios, ver figura 3.6. Esto le permite a los técnicos la operación del interruptor automático, para propósitos de mantenimiento. En la posición de desconexión, el interruptor está completamente desconectado del barraje, sin embargo el permanece dentro de la celda.



Figura 3.4: Interruptor automático de media tensión usado en celdas  
Fuente: Asia electrical power equipment (Shenzhen)



Figura 3.5: Palanca de maniobra con cremallera  
Fuente: AMVAC™. Interruptor de circuito en vacío de media tensión. Catálogo de ABB

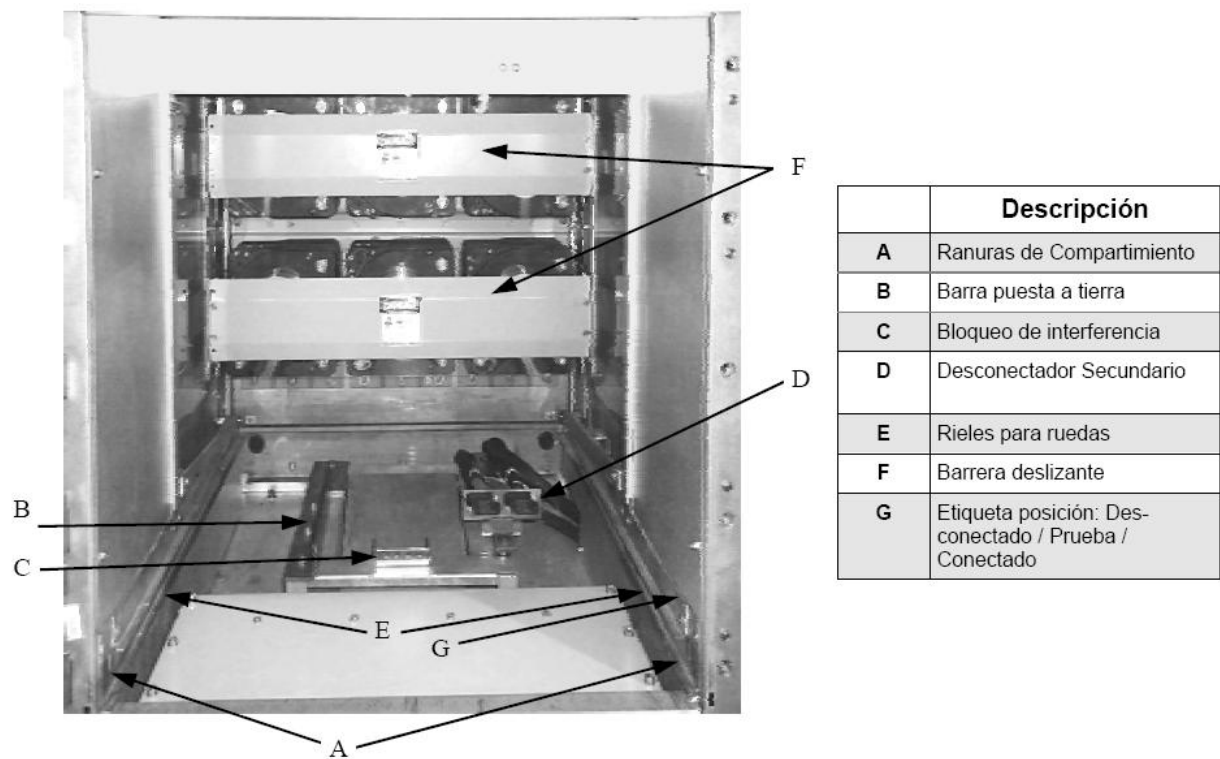


Figura 3.6: Celda con la puerta abierta donde se muestra el cubículo donde se ubica el interruptor automático

Fuente: AMVAC™. Interruptor de circuito en vacío de media tensión. Catálogo de ABB

Seguridad mínima recomendada para la operación de celdas con enchape metálico, resistentes al arco y con puertas cerradas.

- Casco ANSI tipo A, B, G, D o E dependiendo del nivel de tensión.
- Gafas de seguridad con protectores laterales.
- Ropa resistente al flameo, seleccionada haciendo uso de los cálculos de flameo por arco.

Seguridad mínima recomendada para la operación de celdas con puertas abiertas y no resistentes al arco

- Casco ANSI tipo A, B, G, D o E dependiendo del nivel de tensión.
- Gafas de seguridad con protectores laterales.
- Guantes de caucho con protectores de cuero, adecuados para el nivel de tensión de trabajo.
- Ropa resistente al flameo, seleccionada haciendo uso de los cálculos de flameo por arco.

En algunos tipos de celdas los paneles frontales, proveen protección contra choque eléctrico y flameo por arco. Esto significa que la celda está diseñada para contener la energía liberada durante un evento de flameo por arco, siempre que sus puertas estén debidamente cerradas y aseguradas. Este tipo de celda se conoce como resistente al arco.

**Operación de celdas con las puertas cerradas.** Se debe tener en cuenta que los operadores deben usar la ropa de protección y elementos de protección recomendados. El operador primario es quien realmente manipula el dispositivo que abre y cierra el interruptor. El operador de respaldo es quien ayuda al operador primario en caso de que ocurra un problema.

Para operar una celda con la puerta cerrada se deben seguir los siguientes pasos:

1. El operador primario debe permanecer al lado del cubículo que contiene el interruptor que se va a operar. El sitio donde el operador permanezca, lo determina el lado en el cual esté la manecilla de operación. Si la manecilla está en el medio, el operador se debe parar bien en el lado de la bisagra o en el lado de la manija de la puerta de la celda, dependiendo de cual de los dos es más resistente.
2. El operador primario debe estar de espaldas a la celda.

3. El operador de respaldo siempre se debe localizar mas lejos de la celda mirando hacia el operador primario.
4. El operador primario debe tomar la manija de operación del interruptor y abrirlo o cerrarlo. Algunos operadores prefieren el uso de pértigas o de sogas para su operación. Esto mantiene los brazos lo mas lejos posible de cualquier riesgo.
5. Si el interruptor puede se puede cambiar de posición (posición de prueba, posición de desconexión) con la puerta cerrada y se va a realizar este procedimiento. El operador primario debe insertar el eje adecuado para su traslado, ver figura 3.5. Durante esta operación el operador primario está mirando en dirección del cubículo del interruptor.
6. Si se requieren procedimientos de bloqueo/etiquetado, el operador primario debe instalar los dispositivos necesarios.

**Operación de celdas con las puertas abiertas.** Si las puertas de la celda deben permanecer abiertas durante el traslado del interruptor se deben seguir los siguientes pasos:

1. El interruptor debe estar abierto, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente con las puertas cerradas.
2. El operador debe abrir el cubículo y trasladar el interruptor a la posición deseada.
3. Si se requiere de procedimientos de bloqueo/etiquetado, el operador primario debe colocar las etiquetas o bloqueadores necesarios.

### 3.5.2. Operación de celdas de baja tensión

Con algunas excepciones, la operación de celdas de baja tensión, es muy similar a la operación de celdas de media tensión. Las figuras de 3.7 a 3.10 muestran varios tipos de celdas de baja tensión y los interruptores empleados en ellas. En esta clase de celdas, el interruptor se mueve dentro de ella, sobre un mecanismo deslizante como se muestra en la figura 3.7. El interruptor automático se dispara por la liberación de poderosos juegos de resortes. Dependiendo del interruptor automático, la liberación de los resortes puede ser manual o eléctrica, mediante un botón en el pánel frontal o un interruptor de control. Los resortes se pueden cargar manual o eléctricamente, dependiendo del tipo de interruptor. Los interruptores se pueden cerrar con otro juego de resortes o por medio de una manija de cerrado manual. Los resortes de los interruptores operados por resortes se pueden cargar tanto manual como eléctricamente. Por ejemplo el interruptor mostrado en la parte inferior de la figura 3.7, es un interruptor

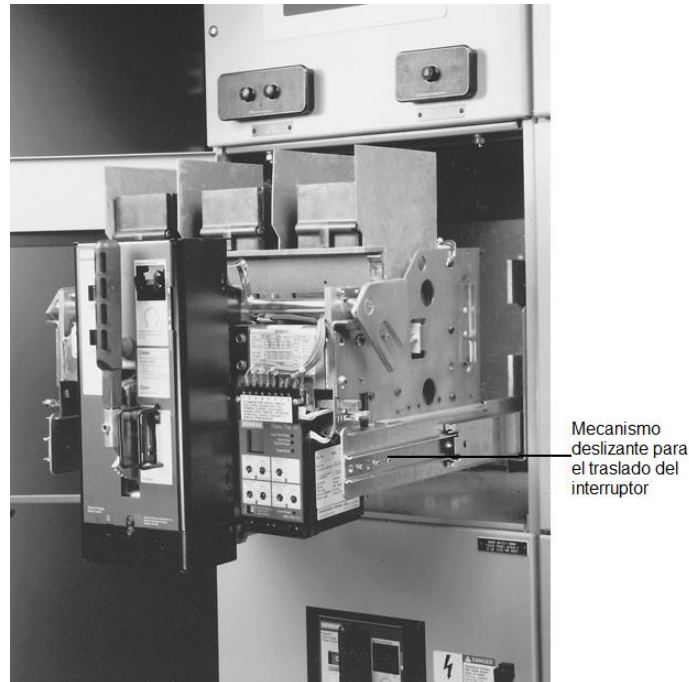


Figura 3.7: Interruptor de potencia de baja tensión completamente separado del barraje  
Fuente: Electrical safety handbook

operado manualmente. Se le da vueltas a una manija para cargar los resortes de cierre. Cuando el resorte está totalmente cargado, el interruptor puede ser cerrado presionando un pequeño botón, el disparo del interruptor se hace también por presión de otro botón. Otros interruptores pueden tener diferentes medios de apertura y cierre.

Los interruptores automáticos de baja tensión conectan la línea y el barraje, por medio de un juego de desconectores visibles en el lado derecho de la parte superior derecha de la figura 3.7. Cuando el interruptor está abierto se puede mover hacia el frente del cubículo, de forma que quede desconectado del barraje y la línea. Esta acción se conoce como el traslado del interruptor. El traslado de interruptores de baja tensión más grandes, va acompañado del uso de ejes removibles. Estos ejes generalmente son del tipo rotatorio. El interruptor puede ser completamente removido de la celda o puede ser puesto en dos o más posiciones auxiliares. Los interruptores automáticos más pequeños se remueven fácilmente empujándolos. Como las celdas de media tensión, la mayoría de las de baja tienen dos posiciones auxiliares. En la posición de prueba, el interruptor se desconecta de la barra, sin embargo su control de potencia siguen siendo aplicado a través de un juego de desconectores secundarios. Esto permite a los técnicos la operación del interruptor con fines de mantenimiento. En la posición de desconexión, el interruptor está completamente desconectado, sin embargo permanece dentro de la celda. En algunos tipos de celdas, el pánel frontal provee al trabajador protección, contra

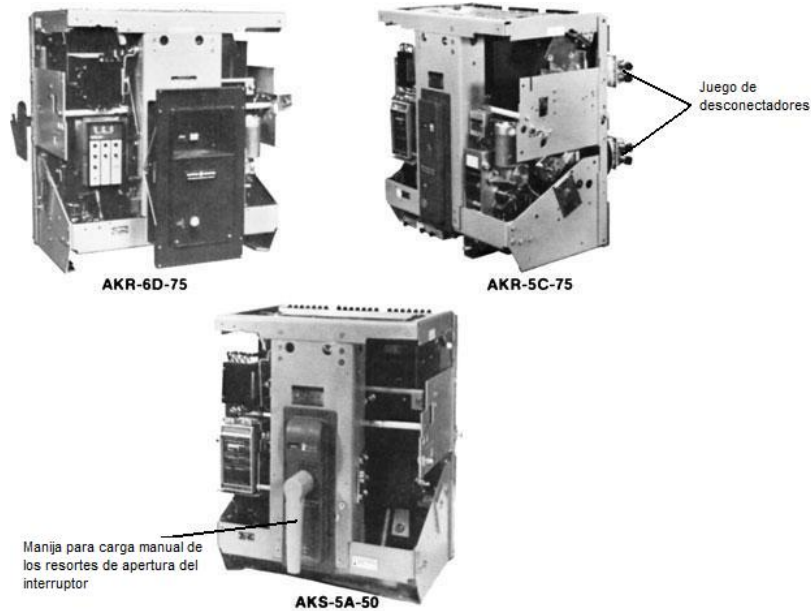


Figura 3.8: Interruptores automáticos de baja tensión usados en las celdas  
Fuente: Electrical safety handbook

flameos por arco. Esto significa que la celda está diseñada para contener el arco, mientras que la puerta permanezca cerrada adecuadamente. Esta clase de celda se conoce como resistente al arco.

**Operación con las puertas cerradas.** La operación con las puertas cerradas es básicamente idéntica a la de los interruptores de media tensión, los operadores deben usar el equipo de seguridad adecuado, cuando desarrollen trabajos con las puertas cerradas o abiertas. Se debe tener en cuenta que ambos operadores deben usar la ropa protectora y los elementos de protección personal adecuados. El operador primario, es quien realmente realiza la apertura o cierre del interruptor, la responsabilidad del operador de respaldo es brindar apoyo en caso de una emergencia. El operador de respaldo, puede ser opcional en algunas instalaciones.

Para la operación de un celda con la puerta cerrada se deben seguir los siguientes pasos:

1. Si el interruptor requiere la carga manual de los resortes, el operador primario se debe poner de cara al interruptor, con el fin de obtener la palanca necesaria para dar vueltas a la manija.
2. Después de cargados los resortes, el operador primario debe permanecer a un lado del cubículo que contenga el interruptor que va a ser operado. El lado en el cual el operador permanezca, debe ser determinado por la posición en la que esté la manija de operación, si la manija de operación está en el medio, el operador se debe ubicar o el lado de la



Figura 3.9: Celda de baja tensión  
Fuente: Central costa sanitary district, planta de tratamiento de agua

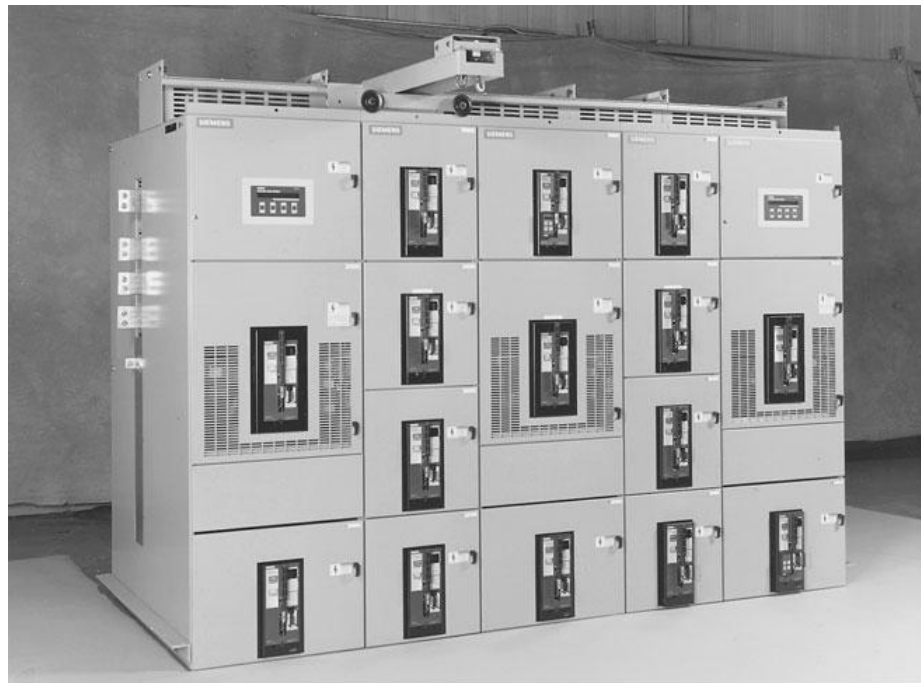


Figura 3.10: Celda metálica de baja tensión  
Fuente: Electrical safety handbook

manija o en el lado de las bisagras de la puerta de la celda, dependiendo de cual lado sea mas resistente (para esto se debe recurrir al manual del fabricante).

3. El operador primario debe estar de espaldas a la celdas (preferiblemente).
4. El operador de respaldo debe permanecer mas lejos de la celda, mirando hacia el operador primario.
5. El operador primario debe manejar los botones de operación y operarlos para abrir o cerrar el interruptor. Se debe tener en cuenta que el operador primario debe continuar de espaldas a la celda. Algunos operadores prefieren el uso de pértigas para su operación, lo que mantiene sus brazos alejados del riesgo.
6. Si el interruptor puede ser trasladado con la puerta cerrada y se va a trasladar dentro o fuera de la celda, el operador primario debe insertar el eje para trasladarlo y moverlo a la posición necesaria. Tenga en cuenta que los interruptores trasladados manualmente no se pueden mover con la puerta cerrada. En este tipo de operación el operador primario debe estar mirando hacia la celda del interruptor.

### 3.5.3. Operación de interruptores en caja moldeada y pánels

Los interruptores en caja moldeada están diseñados para que su caja contenga completamente la energía del arco, de la corriente interrumpida, como se muestra en la figura 3.10. Tales interruptores son montados de forma permanente en encerramientos individuales o pánels figura 3.11. El accionador manual de los interruptores en caja moldeada tiene tres posiciones: abierta cerrada y disparada. Cuando el operario abre el interruptor, lo hace moviendo el accionador manual a la posición de abierta. Asimismo la operación de cerrado del interruptor, se acompaña por el movimiento de la manija a la posición de cerrado.

Cuando el interruptor se dispara por medio de un dispositivo de protección automático, el accionador se ubica en la posición de disparada. La posición de disparada, es una posición intermedia entre las posiciones totalmente cerrada y totalmente abierta. Después de un disparo, el interruptor no puede ser operado hasta que el accionador sea puesto en la posición de abierto. Esta acción reajusta el mecanismo interno de disparo.

**Operación.** Los interruptores automáticos no se deben emplear para la rutina de energización o desenergización de circuitos, a menos que sean fabricados y rotulados para tal propósito. Estos pueden ser empleados ocasional e inusualmente para la desconexión del servicio.



Figura 3.11: Interruptor automático de caja moldeada  
Fuente: PowerPact, molded case circuit breaker, catálogo Square D

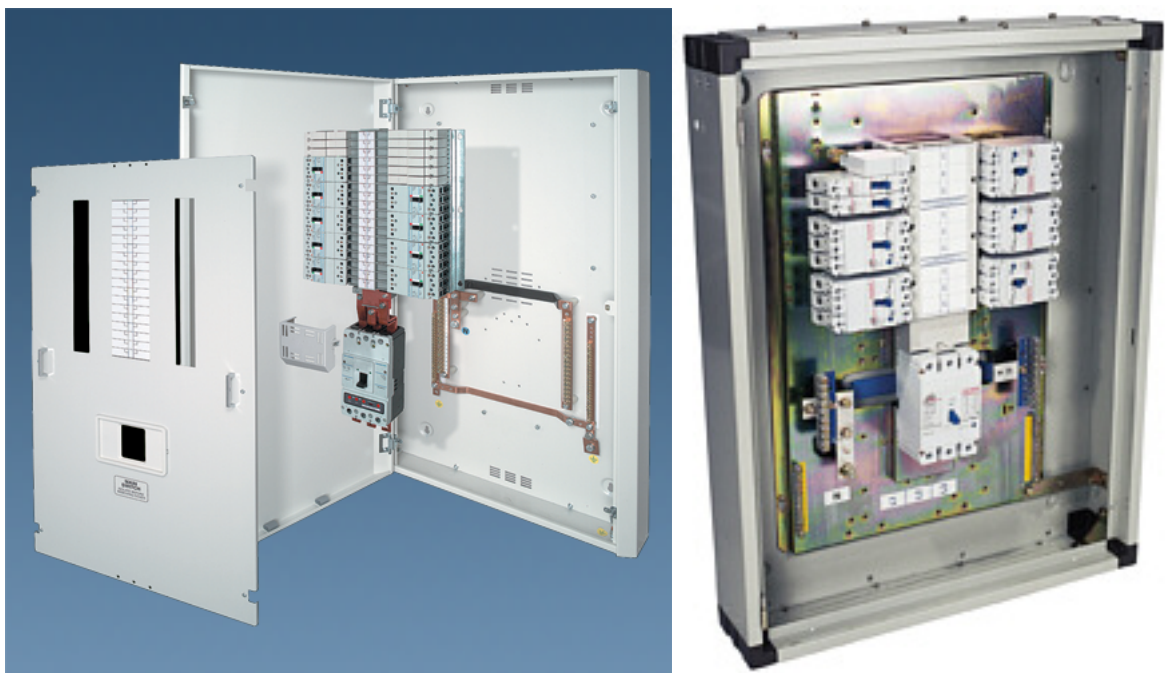


Figura 3.12: Páneles equipados con interruptores automáticos en caja moldeada  
Fuente: Invicta panelboards

Equipo mínimo de seguridad que se debe usar cuando se operan interruptores automáticos de caja moldeada

- Casco ANSI tipo A, B, E, o G.
- Gafas de seguridad con protectores laterales.
- Ropa resistente al flameo, seleccionada mediante los cálculos de flameo por arco.
- Protección de las manos, guantes de cuero o resistentes al flameo, no necesitan ser aislantes.

El procedimiento para la operación segura de interruptores automáticos de caja moldeada se puede resumir de la siguiente forma:

1. El operador debe permanecer al lado del interruptor o del pánel de frente a el. El operador puede permanecer en cualquiera de los lados, dependiendo de la disposición física del  rea.
2. El operador debe tomar el accionador manual del interruptor, con la mano mas cercana a este.
3. El operador debe voltear su cabeza mirando en dirección contraria a la posición del interruptor y mover el accionador manual a la posición deseada.
4. Si se requiere el uso de dispositivos de bloqueo/etiquetado se deben poner en el interruptor de forma adecuada.

#### **3.5.4. Operación de interruptores encapsulados y de desconectores**

La figura 3.12 muestra diferentes tipos de interruptores en encerramientos. Estos dispositivos se emplean como circuitos de conexión o desconexión. Estos dispositivos pueden operar con carga o sin ella. Si no son diseñados para operar bajo carga, no se deben operar cuando fluyan corrientes por el circuito. Los dispositivos que tengan extintores de arco, posiblemente se puedan operar bajo carga, ver lado derecho de la figura 3.12. Estos interruptores se operan moviendo una manija. En algunas unidades la manija est  encerrada, para prevenir la operación accidental. Los interruptores encapsulados tienen un bloqueo mecánico que previene



Figura 3.13: Tipos de interruptores encapsulados  
Fuente: controles industriales Hubbell, interruptores KATKO

que sean abiertos hasta que la manija este en la posición de abierta. Solo personal calificado puede desactivar el bloqueo, si es necesario para propósitos de mantenimiento o reparación. Estos interruptores no deben ser operados con la puerta abierta, cuando la corriente está fluyendo. Se debe ser muy cauteloso al abrir interruptores de media tensión.

La operación básica de estos interruptores, es muy similar al procedimiento dado para la operación de interruptores. Se debe tener en cuenta que no se deben usar para interrumpir la corriente de carga a menos que hayan sido fabricados para este propósito.

Equipo mínimo de seguridad que se debe usar durante la operación de interruptores encapsulados

- Casco. ANSI tipo A, B, E, o G dependiendo del nivel de tensión.
- Gafas de seguridad con protectores laterales.
- Ropa resistente al flameo, seleccionada usando cálculos de flameo por arco.

El procedimiento se puede resumir de la siguiente forma:

1. El operador debe permanecer al lado del interruptor o pánel mirando hacia el. El operador se puede ubicar en cualquiera de los dos lados, dependiendo de la distribución física del área.
2. El operador debe tomar la manija con la mano mas cercana al interruptor.



Figura 3.14: Arrancador de motor de baja tensión

Fuente: Arkansas electrical company

3. El operador debe voltear su cabeza en dirección opuesta a la del interruptor y luego mover la manija de operación a la posición deseada.
4. Si se requiere el uso de bloqueadores o etiquetas, estas se deben colocar de forma adecuada.

### 3.5.5. Operación de arrancadores de motores

La operación de arrancadores de motores, con algunas excepciones es muy similar a la operación de celdas de media y baja tensión. La figura 3.13 muestra un arrancador de un motor en una cabina para montaje en la pared. En el centro de control de motores, los arrancadores se montan en un mecanismo especialmente diseñado para este propósito. En cualquiera de los tipos de construcción el motor para y arranca al presionar el botón adecuado, el arrancador también cuenta con un fusible de desconexión o un interruptor automático de caja moldeada que se usa para desconectar el motor y sus circuitos de la fuente de potencia.

Los arrancadores de motores usados en los centros de control de motores se conectan al barraje y a la línea por medio de una serie de desconectores. Cuando el arrancador está abierto, se puede mover hacia el frente del cubículo quedando desconectado del barraje y de la

línea. Esta acción se refiere al traslado del interruptor. El traslado de los arrancadores, por lo general se hace manualmente. El arrancador puede ser completamente removido del centro de control de motores. Se debe tener en cuenta que contactores mas grandes, de media tensión, pueden ser operados como interruptores automáticos de media tensión. En muchos tipos de centros de control de motores, el pánel frontal provee protección al trabajador contra arco y choque eléctrico. Esto significa, que este centro de control de motores est  diseñado para contener la energía proveniente de un posible evento de flameo por arco, siempre y cuando la puerta este debidamente cerrada y asegurada.

**Operación con la puerta cerrada.** La operación de los arrancadores de motores es idéntica a la operación con la puerta cerrada de interruptores automáticos. El uso de los elementos de seguridad se debe usar en el desarrollo de tareas tanto con las puertas abiertas o cerradas. El operador primario, es el trabajador que realmente manipula la manija que activa o desactiva el arrancador del motor. La responsabilidad del operador de respaldo es ayudar al operador primario en caso de un problema.

Para la operación de arrancadores con la puerta cerrada se deben aplicar los siguientes pasos:

1. Presione el botón de parar, para detener el motor.
2. Después de que el motor est  detenido, el operador primario se debe parar al lado del cubículo que contenga el arrancador a ser operado. El lado en el cual el operador permanezca, es determinado por el lado en el cual, está ubicada la manija de operación. Si la manija de operación está en el medio, el operador puede permanecer en el lado de las bisagras o de las manijas de la puerta, dependiendo de cual de los dos lados sea mas fuerte.
3. El operador primario se debe parar de espaldas a la celda. Se debe tener en cuenta que la manija de operación tiene un mecanismo de operación muy ajustado.
4. El operador de respaldo se debe ubicar mas lejos del cubículo, mirando hacia el operador.
5. El operador primario debe tomar la manija de operación y operarla para activar o desactivar el arrancador. Se debe tener en cuenta que el operador primario, debe mantenerse de espaldas a la celda. Algunos operadores prefieren el uso de pértigas o sogas, lo cual mantiene los brazos los mas lejos del peligro.

6. Si el arrancador puede ser trasladado con la puerta cerrada (una configuración inusual) y si se va a mover, dentro o fuera de la celda, el operador primario, debe insertar la manija de traslado y mover el arrancador. Se debe tener en cuenta que cuando los arrancadores sean trasladados manualmente, no se pueden mover con la puerta cerrada.
7. Si se requieren de los procedimientos de bloqueo/etiquetado, el operador primario los debe instalar de forma adecuada.

**Operación con la puerta abierta.** Si la puerta debe permanecer abierta para el traslado del arrancador, se deben seguir los siguientes pasos:

1. El motor se debe parar de la forma descrita anteriormente para la operación con la puerta cerrada.
2. El operador primario debe abrir la puerta del cubículo y trasladar el arrancador a la posición deseada.
3. Si se requieren dispositivos de bloqueo o etiquetado, el operador primario debe instalar los elementos necesarios.

# Capítulo 4

## Análisis de riesgo ante flameo por arco

### 4.1. Introducción

La primera investigación relacionada con los riesgos asociados con el arco eléctrico, fué hecha por [Lee, 1982], en su artículo, el otro riesgo eléctrico: las quemaduras y explosión del arco. El Dr. Lee fué el primero en describir los eventos térmicos asociados con el arco eléctrico y sus efectos en el cuerpo humano. Definió  $1,2 \text{ cal/cm}^2$  como el nivel de energía para quemaduras curables (definido como el límite mas bajo para quemaduras de tercer grado). Estos parámetros se usan aun hoy en día, para determinar la distancia a la cual se tendrán quemaduras curables desde un arco eléctrico en el aire. Este artículo incluía curvas para determinar las ondas de presión a varias distancias basadas en la falla y su localización.

Dos artículos posteriores fueron mas allá, definiendo las energías en las fallas de arco. El primero [Bingham y otros, 1997] “Actualización de pruebas en ropa protectora y equipos en exposición al arco eléctrico”. En este artículo se usaron datos de pruebas empíricas para determinar la energía incidente a diferentes distancias de un arco de baja tensión. Ellos fueron los primeros en expresar el efecto direccional del arco dentro de un encerramiento. En [Doughty y otros, 2000], estimación de la energía incidente, para un mejor manejo del riesgo en sistemas de distribución de 600 V, se definía la energía incidente en función de la distancia al punto de arco, de la corriente de arco y del tiempo de despeje de los arcos en encerramientos o al aire libre.

Este trabajo fué incluido en la edición del 2000 de NFPA 70E, norma de requerimientos de seguridad para los sitios de trabajo, para el desarrollo de prácticas de trabajo seguras, en relación al riesgo por arco, pero limitado a aplicaciones de baja tensión. Este trabajo además sentó las bases de futuras investigaciones que resultaron en la publicación de [IEEE 1584, 2002]: Guía para el desarrollo de cálculos asociados a los riesgos ante un evento de flameo por arco.

La norma [IEEE 1584, 2002] contiene métodos de cálculo, desarrollados a partir de pruebas de diversas fuentes, para determinar las distancias seguras para el personal sin protección y la energía incidente para personal calificado que trabaje en equipos eléctricos. El cálculo de la energía incidente, estaba dirigido a determinar el nivel requerido de los elementos de protección. Las ecuaciones desarrolladas en esta norma, se basan en la corriente de falla, la tensión, el tiempo de despeje, el tipo del equipo, la puesta a tierra y la distancia de trabajo. El análisis de riesgo ante flameo por arco, es un estudio investigativo sobre el nivel de exposición de un trabajador, a la energía del arco eléctrico, el cual se lleva a cabo mediante los cálculos de energía incidente y límites de protección contra flameo. La finalidad de este análisis es la prevención de las lesiones y la determinación de prácticas seguras de trabajo y niveles apropiados de elementos de protección personal.

## 4.2. Métodos de análisis ante flameo por arco

El análisis de los riesgos ante flameo por arco se puede llevar a cabo mediante diversos métodos. El método elegido puede estar basado en la información disponible, volúmenes de cálculo de trabajo, la necesidad de precisión, la disponibilidad. Cualquier método empleado, requiere que lo realice personal calificado, el cual debe tener en cuenta las limitaciones que el método contiene, con la finalidad de obtener los mejores resultados. Los métodos para el análisis se basan principalmente de acuerdo con lo establecido en las siguientes normas:

- [NFPA 70E, 2004]
- [IEEE 1584, 2002]

Con el análisis de riesgo ante flameo por arco y la adecuada selección del equipo de protección, se pueden evitar lesiones, tales como quemaduras fatales, que propiciarían un periodo largo de recuperación del personal afectado y en su caso hasta la muerte; significando pérdidas humanas, económicas y de producción para la empresa, además de sustitución de equipo que integra el sistema eléctrico en cuestión.

### 4.2.1. Método de la norma [IEEE 1584, 2002]

Este método ofrece las ecuaciones necesarias para la estimación de la energía incidente y los límites de protección contra flameo, basados en análisis estadísticos y ajuste de curvas de datos disponibles de pruebas.

Los datos fueron generados por pruebas realizadas por un grupo de trabajo del IEEE, destinadas a reproducir los modelos de la energía incidente. Basados en los niveles normalizados para la selección de elementos de protección personal, se estimó que un elemento de protección personal es adecuado o mas que adecuado, si protegía contra quemaduras de segundo grado el 95 % de las veces.

### Limitaciones del modelo

El modelo es aplicable para los siguientes rangos:

- Tensiones entre 208 V – 15000 V y frecuencias entre 50 Hz – 60 Hz.
- Corriente de falla de contacto de 700 A – 106000 A.
- Puestas a tierra de cualquier tipo o sin puestas a tierra Encerramientos de equipos de tamaños comúnmente disponibles.
- Separación entre conductores de 13 mm – 152 mm.
- Fallas que involucran las tres fases.

#### 4.2.1.1. Cálculo de la corriente del arco

A partir de esta, se puede determinar el tiempo de operación de los dispositivos de protección, se debe esperar que esta corriente sea menor que la corriente de falla de contacto debido a los efectos de la resistencia del sistema de tierra y de la resistencia de la falla.

Del análisis de los datos, se llegó a la conclusión que la corriente del arco depende principalmente de la corriente de falla de contacto (corriente a resistencia de falla igual a cero ). La separación entre conductores, la tensión del sistema y el tipo de puesta a tierra tienen efectos pequeños.

- **Corriente de arco a tensiones menores a 1 kV**

La ecuación (4.1) define la corriente de arco a tensiones menores a 1 kV. El modelo se diferencia dependiendo de si se aplica en encerramientos o al aire libre.

$$\log(I_A) = K + 0,662 \cdot \log(I_{bf}) + 0,0966 \cdot V + 0,000562 \cdot G + 0,5588 \cdot V \cdot \log(I_{bf}) + 0,00304 \cdot G \cdot \log(I_{bf}) \quad (4.1)$$

log: logaritmo en base 10.

$I_A$ : corriente del arco en kA.

$I_{bf}$ : corriente eficaz de falla de contacto para fallas trifásicas en kA (corriente a resistencia de falla igual a cero).

K: es 0,153 para el aire libre.

es -0,097 para encerramientos.

V: tensión del sistema en kV.

G: separación entre fases en mm.

#### ■ Corriente de arco a tensiones mayores o iguales a 1 kV

La ecuación (4.2) define la corriente de arco a tensiones mayores o iguales a 1 kV. El modelo no hace diferencia entre si se aplica al aire libre o en encerramientos:

$$\log(I_A) = 0,0042 + 0,983 \cdot \log(I_{bf}) \quad (4.2)$$

$$I_A = 10^{\log(I_{bf})} \quad (4.3)$$

Es difícil predecir la corriente del arco de forma precisa. La corriente del arco se usa para hallar el tiempo de operación del dispositivo de protección. Para dispositivos de protección, que estén trabajando en la parte de alta pendiente de la curvas de tiempo-corriente, un cambio pequeño en la corriente de arco puede producir un gran cambio en el tiempo de operación y esta variación puede tener un efecto grande en la energía incidente. Por lo tanto, se calcula además el tiempo de operación del dispositivo de protección para una corriente de arco 15 % menor. Con los dos tiempos de operación se calcula la energía incidente con la ecuación (4.5) y se toma como resultado del modelo la energía incidente más grande [IEEE 1584, 2002].

Esta solución la encontró el equipo de trabajo de IEEE, comparando los cálculos de corriente de arco, con las mediciones hechas durante las pruebas.

#### 4.2.1.2. Cálculo de la energía incidente y límites de protección contra flameo

##### ■ Energía incidente a tensiones desde 1 kV a 15 kV

Primero se debe calcular la energía incidente normalizada para un tiempo de duración del arco de 0,2 s y una distancia del punto de arco de 610 mm, ecuación (4.4).

$$\log(E_n) = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \log(I_A) + 0,0011 \cdot G \quad (4.4)$$

$E_n$ : energía incidente normalizada en J/cm<sup>2</sup>.

log: logaritmo en base 10.

$K_1$ : 0,792 configuraciones abiertas.

0,555 equipos en encerramientos.

$K_2$ : 0 para sistemas sin puesta a tierra.

0,113 para sistemas con puesta a tierra.

G: separación entre conductores en mm.

La conversión de la energía normalizada, se hace mediante la ecuación (4.5):

$$E = 4,184 \cdot E_n \cdot C_f \cdot \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (4.5)$$

E: energía incidente en J/cm<sup>2</sup>.

$C_f$ : factor de cálculo.

1 tensiones por encima de 1kV hasta los 15kV.

1,5 tensiones menores o iguales a 1kV.

D: distancia de la persona al posible punto de arco en mm.

x: exponente de distancia, tabla 4.1.

### Exponente de distancia x

El exponente de distancia de la tabla 4.1, está basado en datos de las pruebas de flameo por arco en cajas de diferente tamaño, ver tabla 4.2, que simulaban las celdas, centros de control de motores, paneles de baja tensión y demás encerramientos. Mediante las medidas

Tabla 4.1: Exponente de distancia y separaciones típicas entre conductores, en diferentes configuraciones

Tensión (kV)	Tipo de equipo	Separación G (mm)	Exponente (x)
0,208 a 1	Aire libre	10 a 40	2
0208 a 1	Tableros de distribución	32	1,473
0,208 a 1	CCM, cajas cortacircuitos	25	1,641
0,208 a 1	Cable	13	2
>1 a 5	Aire libre	102	2
>1 a 5	Tableros de distribución	13 a 102	0,973
>1 a 5	Cable	13	2
>5 a 15	Aire libre	13 a 153	2
>5 a 15	Tableros de distribución	153	0,973
>5 a 15	Cable	13	2

Fuente: IEEE 1584-2004 Guide for performing arc flash hazard calculations

Tabla 4.2: Dimensiones de las cajas usadas en las pruebas de laboratorio, para diferentes tipos de encerramientos

Tensión (kV)	Encerramiento	Dimensiones (mm)
0,208 a 1	Tableros de distribución	508 x 508 x 508
0,208 a 1	CCM, cajas cortacircuitos	305 x 356 x 191
>1 a 15	Tableros de distribución	1143 x 762 x 762

Fuente: IEEE 1584-2004 Guide for performing arc flash hazard calculations

Tabla 4.3: Nivel de EPP calculado versus nivel de EPP medido, baja tensión

Factor de cálculo	Niveles de diferencia					Factor de seguridad
	Dos arriba	Uno arriba	Iguales	Uno abajo	Dos abajo	
1	1	10	129	25	0	85 %
1,25	1	30	113	21	0	88 %
1,5	2	49	106	8	0	95 %
1,75	2	75	86	2	0	98 %
1,9	2	82	79	2	0	98 %

Fuente: IEEE 1584-2004 Guide for performing arc flash hazard calculations

Tabla 4.4: Nivel de EPP calculado versus nivel de EPP medido, baja tensión

Factor de cálculo	Niveles de diferencia					Factor de seguridad
	Dos arriba	Uno arriba	Iguales	Uno abajo	Dos abajo	
1	0	7	131	8	0	95 %
1.25	0	35	109	2	0	98 %
1.5	0	57	89	0	0	100 %
1.75	0	76	70	0	0	100 %
1.9	0	76	70	0	0	100 %

Fuente: IEEE 1584-2004 Guide for performing arc flash hazard calculations

de energía incidente, respecto a la distancia al punto del arco y haciendo uso del ajuste a curvas, se encuentra una ecuación que relaciona la energía incidente con la distancia.

### Factor de cálculo por nivel de tensión $C_f$

El modelo creado mediante el análisis estadístico, se desarrolló comparando el nivel de elementos de protección personal (EPP) basados en las mediciones y en los cálculos. Se buscaba un factor de multiplicación, para el nivel de los elementos de protección personal basados en cálculos, que asegurara un nivel de seguridad del 95 %, es decir que para este nivel calculado se protegiera en un 95 % de los casos al trabajador de quemaduras de segundo grado. El nivel del elemento de protección personal se refiere a su nivel de protección contra quemaduras de segundo grado a determinado nivel de energía. Para este análisis, los niveles de energía incidente se fijaron en 1,2, 8, 25, 40 y 100 cal/cm<sup>2</sup>.

En la tabla 4.3 se observa que para un factor de cálculo de 1,5 se logra un factor de seguridad del 95 %.

- Límite de protección contra flameo a tensiones desde 1 kV a 15 kV

En el caso de que la tensión esté entre 1000 V y 15 000 V, el cálculo de la distancia límite de protección contra flameo se hace mediante la ecuación (4.6).

$$D_B = \left[ 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_n} \right) \right]^{1/x} \quad (4.6)$$

$D_B$ : distancia al punto de arco mm.

$C_f$ : factor de cálculo.

1 para tensiones por encima de 1kV.

1,5 para tensiones menores o iguales a 1kV.

$E_n$ : energía incidente normalizada J/cm<sup>2</sup>.

$E_B$ : energía incidente a la distancia de protección contra flameo J/cm<sup>2</sup>.

x: exponente de distancia, tabla 4.1.

t: tiempo de duración del arco en segundos.

#### ■ Energía incidente a tensiones mayores a 15 kV

En el caso de que la tensión sea mayor a 15 000 V o la separación entre conductores no esté dentro del rango del modelo, el cálculo de la energía incidente se hace mediante la ecuación (4.7) desarrollada por [Lee, 1982]:

$$E = 2,142 \cdot 10^6 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (4.7)$$

E: energía incidente J/cm<sup>2</sup>.

V: tensión del sistema kV.

t: tiempo del arco en segundos.

D: distancia al punto de arco mm.

$I_{bf}$ : corriente de falla de contacto, que para este nivel de tensión es igual a la corriente del arco kA.

#### ■ Límite de protección contra flameo a tensiones mayores a 15 kV

En el caso de que la tensión sea mayor a 15 000 V, el cálculo de la distancia límite de protección contra flameo se hace mediante la ecuación (4.8).

$$D_B = \sqrt{2,142 \cdot 10^6 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot \left(\frac{t}{E_B}\right)} \quad (4.8)$$

$D_B$ : distancia al punto de arco, protección contra flameo, mm.

$I_{bf}$ : corriente de falla de contacto, que para este nivel de tensión es igual a la corriente del arco a este nivel de tensión, en kA.

$E_B$ : energía incidente a la distancia de protección contra flameo en J/cm<sup>2</sup>.

$t$ : tiempo del arco en segundos.

#### 4.2.1.3. Ecuaciones de energía incidente y límite de protección contra flameo en interruptores automáticos de baja tensión

Se han desarrollado ecuaciones para sistemas que utilicen interruptores automáticos de baja tensión como sistema de protección. Las ecuaciones de la tabla 4.5 se pueden emplear dentro de los rangos de 700 A-106000 A. Cada ecuación es aplicable para el rango  $I_1 < I_{bf} < I_2$  dependiendo del interruptor automático, asegurándose que la corriente de falla a la que se va aplicar el modelo, esté dentro de este rango ( $I_1 < I_{bf} < I_2$ ).

- $I_1$ : corriente mínima de falla de contacto a la cual las ecuaciones de la tabla 4.5 pueden ser utilizadas. Es el nivel mínimo de corriente de falla de contacto, que genera la corriente de arco suficiente para producir disparo instantáneo.
- $I_2$ : rango de interrupción del interruptor automático.

Para calcular la corriente de falla de contacto  $I_1$ , es necesaria la corriente de falla de arco  $I_t$ , la cual se puede leer en la curva tiempo-corriente del interruptor automático en la figura 4.1, y corresponde al valor de corriente de disparo instantáneo. Si la corriente de disparo instantáneo no está disponible, se usa 10 veces la corriente nominal del interruptor automático. En interruptores de menos de 100 A se toma como valor de  $I_t$ , 1300 A.

Se resuelve la ecuación (4.9):

$$\lg(1,3I_t) = K + 0,662 \cdot \lg(I_1) + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot \lg(I_1) + 0,00304 \cdot G \cdot \lg(I_1) \quad (4.9)$$

Tabla 4.5: Ecuaciones de energía incidente y límites de protección contra flameo para diferentes tipos de interruptores y rangos de corriente

Rango del interruptor	Tipo de interruptor	Unidad de disparo	$V \leq 480$		575 - 690 V	
			Energía(cal/cm <sup>2</sup> )	D <sub>Límite</sub> (mm)	Energía(cal/cm <sup>2</sup> )	D <sub>Límite</sub> (mm)
100 - 400	CM	T o TM	$0,189 \cdot I_{bf} + 0,548$	$9,16 \cdot I_{bf} + 194$	$0,271 \cdot I_{bf} + 0,180$	$11,8 \cdot I_{bf} + 196$
600 - 1200	CM	T o TM	$0,223 \cdot I_{bf} + 1,159$	$8,45 \cdot I_{bf} + 364$	$0,335 \cdot I_{bf} + 0,380$	$11,4 \cdot I_{bf} + 369$
600 - 1200	CM	E, LI	$0,337 \cdot I_{bf} + 1,36$	$12,5 \cdot I_{bf} + 428$	$0,468 \cdot I_{bf} + 4,6$	$14,3 \cdot I_{bf} + 568$
1600 - 6000	CM, CA	TM o E, LI	$0,448 \cdot I_{bf} + 3,0$	$11,1 \cdot I_{bf} + 696$	$0,686 \cdot I_{bf} + 0,165$	$16,7 \cdot I_{bf} + 606$
800 - 6300	LVPCB	E, LI	$0,636 \cdot I_{bf} + 3,67$	$14,5 \cdot I_{bf} + 786$	$0,958 \cdot I_{bf} + 0,292$	$19,1 \cdot I_{bf} + 864$
800 - 6300	LVPCB	E, LS	$4,56 \cdot I_{bf} + 27,23$	$47,2 \cdot I_{bf} + 2660$	$6,86 \cdot I_{bf} + 2,17$	$62,4 \cdot I_{bf} + 2390$

Fuente: IEEE 1584 2002. Guide for performing arc flash hazard calculations

En la ecuación (4.9) se realizaron los siguientes ajustes:

Se aumentó la corriente de disparo instantáneo a  $1,3I_t$ , llevándola al máximo de la banda de disparo instantáneo, G se escoge dependiendo de la separación entre conductores tabla 4.1, K se escoge dependiendo de la configuración, es decir si los interruptores están en encerramientos (tableros de distribución, o en centros de control de motores etc.) o al aire libre, ver ecuación (4.1).

CM<sup>1</sup>T<sup>2</sup>TM<sup>3</sup>E,LI<sup>4</sup>CA<sup>5</sup>LVPCB<sup>6</sup>E,LS<sup>7</sup>

La persona que realice los cálculos, debe asegurarse que la corriente de falla  $I_{bf}$ , para la cual esté aplicando las ecuaciones de la tabla 4.5, esté por encima de  $I_1$ , debido a que para valores de corriente por debajo de esta, el interruptor automático está operando en la parte de la curva de disparo por sobrecorriente, figura 4.1. En esta zona, debido a que el tiempo de despeje de la falla es alto, la energía puede aumentar rápidamente llegando a las 100 cal/cm<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Interruptor automático de caja moldeada<sup>2</sup>Disparo térmico<sup>3</sup>Disparo térmico-magnético<sup>4</sup>Disparo electrónico, tiempo largo e instantáneo<sup>5</sup>Interruptor automático en caja aislada<sup>6</sup>Interruptor automático de potencia para baja tensión<sup>7</sup>Disparo electrónico, tiempo largo y corto

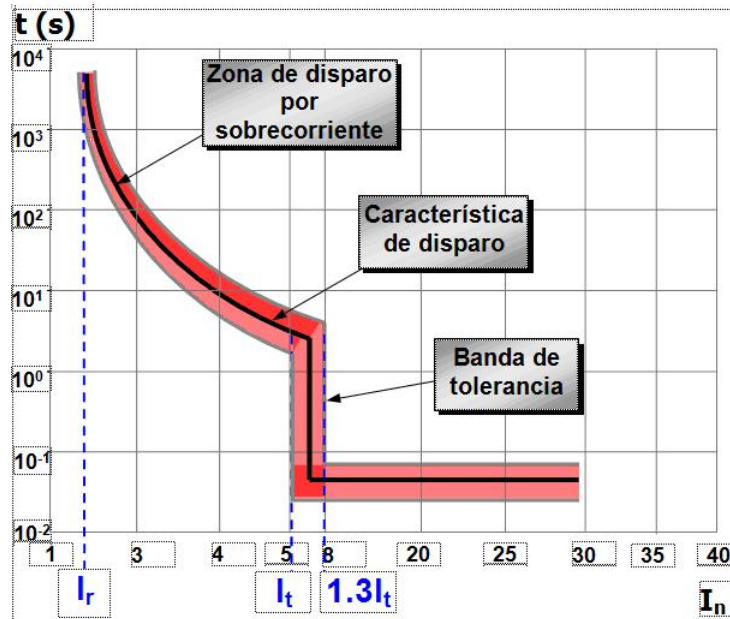


Figura 4.1: Característica tiempo - corriente de un interruptor automático  
Fuente: Electroinstalador, 2008

#### 4.2.2. Método de la norma [NFPA 70E, 2004]

El método descrito en esta norma incluye las ecuaciones desarrolladas por [Lee, 1982], las desarrolladas por [Doughty y otros, 2000], y las desarrolladas por el grupo de trabajo de la norma [IEEE 1584, 2002]. El empleo de estas ecuaciones aumenta los rangos en los que el método se puede utilizar.

##### 4.2.2.1. Cálculo del límite de protección contra flameo

La corriente de cortocircuito trifásica de una falla de contacto trifásica en los terminales del transformador se calcula con la ecuación (4.10):

$$I_{sc} = \left( \left( \frac{MV A_{BASE} \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot V} \right) \left( \frac{100}{Z_{\%}} \right) \right) \quad (4.10)$$

$I_{sc}$ : corriente de cortocircuito simétrico, por falla trifásica de contacto en los terminales del transformador en A.

$Z_{\%}$ : impedancia en por ciento, en las bases del transformador.

$V$ : nivel de tensión V.

La capacidad de cortocircuito en un arco trifásico, se calcula mediante la ecuación (4.11):

$$MVA_{bf} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{SC} \quad (4.11)$$

$MVA_{bf}$ : MVA de falla de contacto en el punto de estudio.

La distancia medida desde la fuente en mm, a la cual se tendrá quemaduras curables de segundo grado, se describe en la ecuaciones (4.12) y (4.13):

$$D_C = 496,18 \cdot \sqrt{MVA_{bf} \cdot t} \quad (4.12)$$

$$D_C = 2218,98 \cdot \sqrt{MVA \cdot t} \quad (4.13)$$

$D_C$ : distancia de la fuente del arco, a la cual se tendrán quemaduras curables de segundo grado mm.

MVA: Capacidad del transformador, en transformadores de capacidad menor a 0,75 MVA multiplíquela por 1,25.

#### 4.2.2.2. Cálculos de energía incidente

##### ■ Energía incidente a tensiones menores o iguales a 600 V

Las siguientes ecuaciones pueden predecir la energía incidente de arcos trifásicos. Los resultados pueden no representar el peor de los casos en todas las situaciones, es necesario que las ecuaciones se usen dentro de las limitaciones indicadas en la definición de las variables. Los parámetros requeridos para hacer los cálculos son los siguientes:

1.  $I_f$  : la máxima corriente de falla trifásica de contacto, disponible en el equipo y el nivel mínimo de corriente al cual el arco será autosostenida. Para sistemas de 480 V se acepta que el mínimo nivel para un arco autosostenible es 38 % de la corriente de falla trifásica de contacto disponible. Los niveles mas altos de energía incidente, se pueden

dar para estas corrientes bajas debido a que el dispositivo de protección puede tomar varios segundos o incluso minutos en abrir. Los cálculos de la energía se deben hacer para las dos corrientes y el resultado del modelo será la energía incidente mas alta. El rango para el cual estas ecuaciones son aplicables es de 16 kA a 50 kA.

2.  $t_A$ : el tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba en perspectiva de la localización del arco) a la máxima corriente de cortocircuito y al nivel mínimo al cual la falla será autosostenida.
3.  $D_A$  : la distancia del trabajador al arco, desde la perspectiva del lugar donde se desarrolla la tarea. El modelo es aplicable para distancias al arco mayores a 457,2 mm.

### Cálculos de energía incidente en el aire libre

Mediante la ecuación (4.14) se calcula la energía incidente al aire libre:

$$E = 629921,86 \cdot D_A^{-1,9593} \cdot t_A \cdot (0,0016 \cdot I_f^2 - 0,0076 \cdot I_f + 0,8938) \quad (4.14)$$

E: energía incidente máxima en cal/cm<sup>2</sup>.

$D_A$ : distancia del arco a los electrodos en mm.

$t_A$ : duración del arco en segundos.

$I_f$ : corriente de cortocircuito en kA.

### Cálculos de energía incidente en encerramientos

Mediante la ecuación (4.15) se calcula la energía incidente en encerramientos de dimensiones máximas de 508 mm en cada uno de sus lados:

$$E = 122079,1 \cdot D_A^{-1,4738} \cdot t_A \cdot (0,0093 \cdot I_f^2 - 0,3453 \cdot I_f + 5,96) \quad (4.15)$$

E: energía incidente máxima en cal/cm<sup>2</sup>.

$D_A$ : distancia del arco a los electrodos mm, aplicable para distancias mayores a 457,2 mm.

$t_A$ : duración del arco en segundos.

$I_f$ : corriente de cortocircuito en kA.

#### ■ Cálculos de energía incidente a tensiones mayores a 600 V

Los parámetros requeridos para hacer los cálculos son los siguientes:

1. La máxima corriente de falla de contacto trifásica disponible en el equipo.
2. El tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba en perspectiva a la localización del arco) a la máxima corriente de cortocircuito.
3. La distancia del arco a la fuente.
4. La tensión del sistema.

$$E = \frac{511611,88 \cdot I_f \cdot V \cdot t_A}{D^2} \quad (4.16)$$

E: energía incidente máxima en cal/cm<sup>2</sup>.

$D_A$ : distancia del arco a los electrodos en mm.

$t_A$ : duración del arco en segundos.

$I_f$ : corriente de falla de contacto en kA.

V: tensión de línea en kV.

# Capítulo 5

## Métodos para la reducción de los riesgos del flameo por arco

### 5.1. Introducción

Guías y regulaciones internacionales recientes acerca de los riesgos del flameo por arco, han centrado su atención en la cuantificación de los peligros ante estos riesgos, en equipos eléctricos energizados de media y baja tensión. Partiendo de que la energía incidente de una falla por arco es directamente proporcional al tiempo de despeje del arco y a la magnitud de la corriente de arco, entonces, tanto la reducción del tiempo del arco como de la magnitud de la corriente, resulta muy beneficiosa. Este capítulo sugiere formas para la reducción de los niveles de riesgo, a través de una detección más rápida de las fallas de arco y métodos generales para la disminución de la magnitud de la corriente.

Además se discutirán soluciones específicas, que pueden ser implementadas en algunas instalaciones. Estas soluciones incluyen implementación de equipos modernos de detección del arco, modificaciones en los dispositivos de protección contra sobrecorriente, aumento de la distancia de trabajo, coordinación de los tiempos de despeje de las protecciones, entre otras.

### 5.2. Métodos tradicionales

#### 5.2.1. Reducción de la corriente de arco

La limitación de la corriente en una falla, significa una reducción de la energía incidente. Al limitar la corriente de arco cuando hay tiempos de despeje cortos (1-3 ciclos), se observa una reducción significativa de la energía incidente. Al disminuir la corriente de falla, esta debe estar dentro del rango de despeje de fallas del dispositivo, por tanto, en últimas, la

reducción de la energía dependerá del tiempo de disparo que resulte a la corriente de arco reducida. Un dispositivo de protección con una característica de tiempo definida, es el mas adecuado para esta técnica de reducción de la energía incidente. Tenga en cuenta que en la mayoría de los casos la reducción de la corriente de arco, conlleva al aumento del tiempo de duración de la misma y por tanto al incremento de la energía incidente. Los niveles de falla se pueden reducir mediante la implementación de cualquiera de los siguientes cambios en diseño y ambos requieren de grandes costos y esfuerzos de ingeniería [Hodder y otros, 2006]: instalación de reactores limitadores de corriente, uso de múltiples transformadores en lugar de uno solo de mayor capacidad, entre otros.

### 5.2.2. Bloqueo selectivo de zona (ZSI)

Provee una coordinación selectiva entre un interruptor principal y los interruptores de alimentadores aguas abajo. Por lo tanto, en caso de una falla, esta protección selectiva del sistema coordina el interruptor principal con los interruptores de alimentadores, de forma que el interruptor de alimentadores, despeje la falla antes que lo haga el principal.

La coordinación selectiva entre los interruptores principal y de alimentadores se logra adicionando retrasos de tiempo a la unidad de disparo del interruptor principal, de esta forma se le da tiempo al interruptor aguas abajo para que interrumpa la falla. El sistema ZSI también le permite al interruptor principal identificar una falla dentro de su zona (aguas arriba de los interruptores de los alimentadores) y despejar la falla sin la adición de retrasos de tiempo. Específicamente en un sistema de protección ZSI, cuando un interruptor de un alimentador detecta una falla cuya corriente es mas grande que su ajuste de corriente de falla a tierra, la unidad de disparo de tiempo corto o la instantánea, le envía una señal de restricción al interruptor principal que esta aguas arriba. El interruptor aguas arriba, al recibir la señal de restricción empieza su conteo normal, dependiendo de su coordinación.

En un primer escenario, el interruptor del alimentador aguas abajo, despeja la falla. En un segundo escenario, si se envía la señal de restricción al interruptor principal y el interruptor de alimentadores no opera, el interruptor principal empezará el conteo y por lo tanto despejará la falla. El interruptor principal actua como respaldo del interruptor de alimentadores, en el caso de que este, no opere correctamente. En un tercer escenario en el que, el dispositivo ZSI, entre el interruptor principal y el interruptor de un alimentador no esté bien conectado, por lo tanto el interruptor principal nunca recibirá la señal de restricción y considerará las fallas dentro de su zona, despejando las fallas sin importar si el interruptor de alimentadores ya esté en proceso de despeje de la misma [Inshaw y otro, 2005].

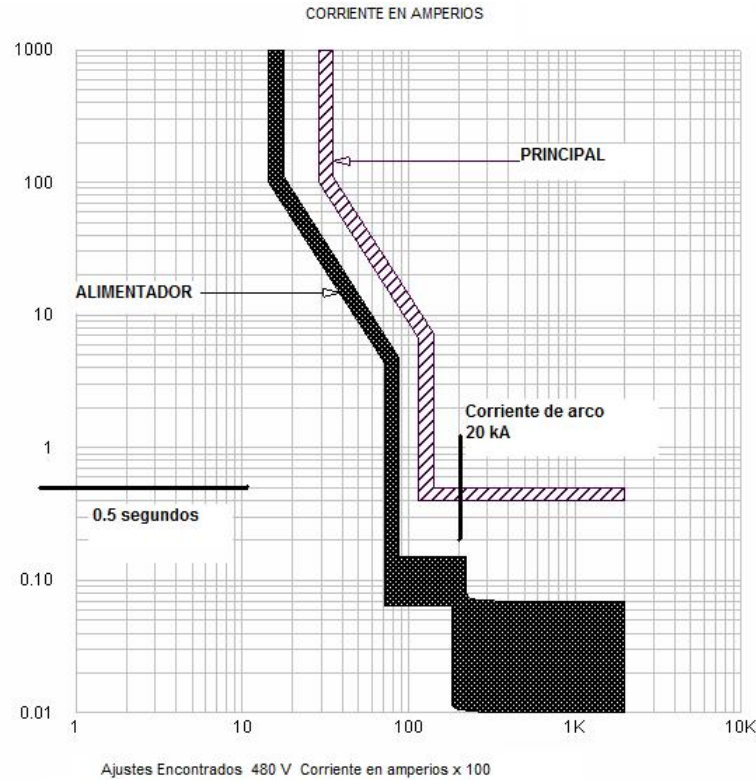


Figura 5.1: Ajustes encontrados del dispositivo de protección

Fuente: A summary of arc flash hazard assessments and safety improvements, IEEE.

### 5.2.3. Coordinación de los tiempos de despeje de las protecciones eléctricas

Un estudio detallado de coordinación es una buena práctica para escoger los mejores ajustes de los interruptores automáticos y los fusibles. Muchas veces los niveles de energía incidente se pueden reducir, ajustando los tiempos de disparo de los equipos existentes. En la figura 5.1 se muestran las curvas tiempo-corriente del interruptor principal y de un interruptor alimentador con los ajustes típicos encontrados y en la figura 5.2 se encuentran los ajustes cambiados.

### 5.2.4. Aumento de la distancia de trabajo

Se parte del hecho que la energía incidente es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al punto posible de arco. La distancia puede ser reducida empleando dispositivos de operación remota, y herramientas de extensión como pértigas. En las figura 5.4 y 5.5 se muestra el impacto de emplear dispositivos remotos para incrementar la distancia de 18"

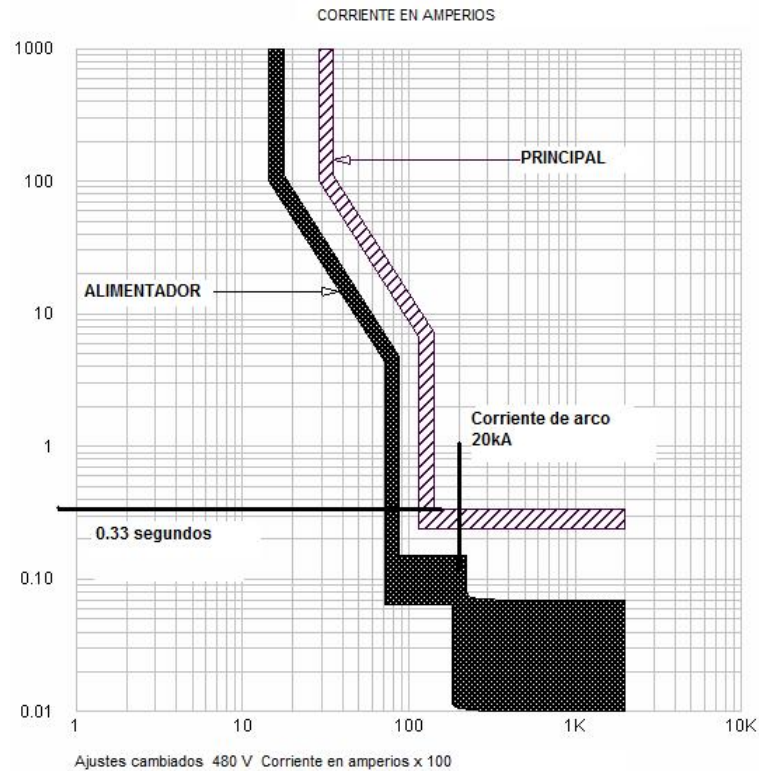


Figura 5.2: Ajustes cambiados al dispositivo de protección

Fuente: A summary of arc flash hazard assesments and safety improvements, IEEE.

(457,2 mm) a 73" (1854,2 mm) reduciendo el peligro de clase 3 a clase 1. En la figura 5.3, se muestra el sistema de potencia analizado.

Los resultados obtenidos en las figuras 5.4 y 5.5, son explicados posteriormente en el capítulo 6.

### 5.3. Nuevas estrategias

Las nuevas estrategias de reducción de la energía incidente, están basadas en los principios de detección del arco. El flameo por arco, típicamente resulta, en un incremento instantáneo de la intensidad de la luz. Los niveles de intensidad, usualmente se elevan miles de veces respecto a los niveles normales del ambiente. Por esta razón, los relés deben tener sensores ópticos para detectar el rápido incremento de la intensidad de la luz. Por razones de seguridad el sensor óptico es supervisado por dispositivos instantáneos de sobrecorriente (dispositivo 50 ANSI) que opera como un detector de falla. Incluyendo la supervisión por el detector de fallas, el tiempo total de operación es menor a 2,5 ms usando relés de salida de estado sólido y mucho mas rápidos que los relés instantáneos convencionales [Inshaw y otro, 2005].

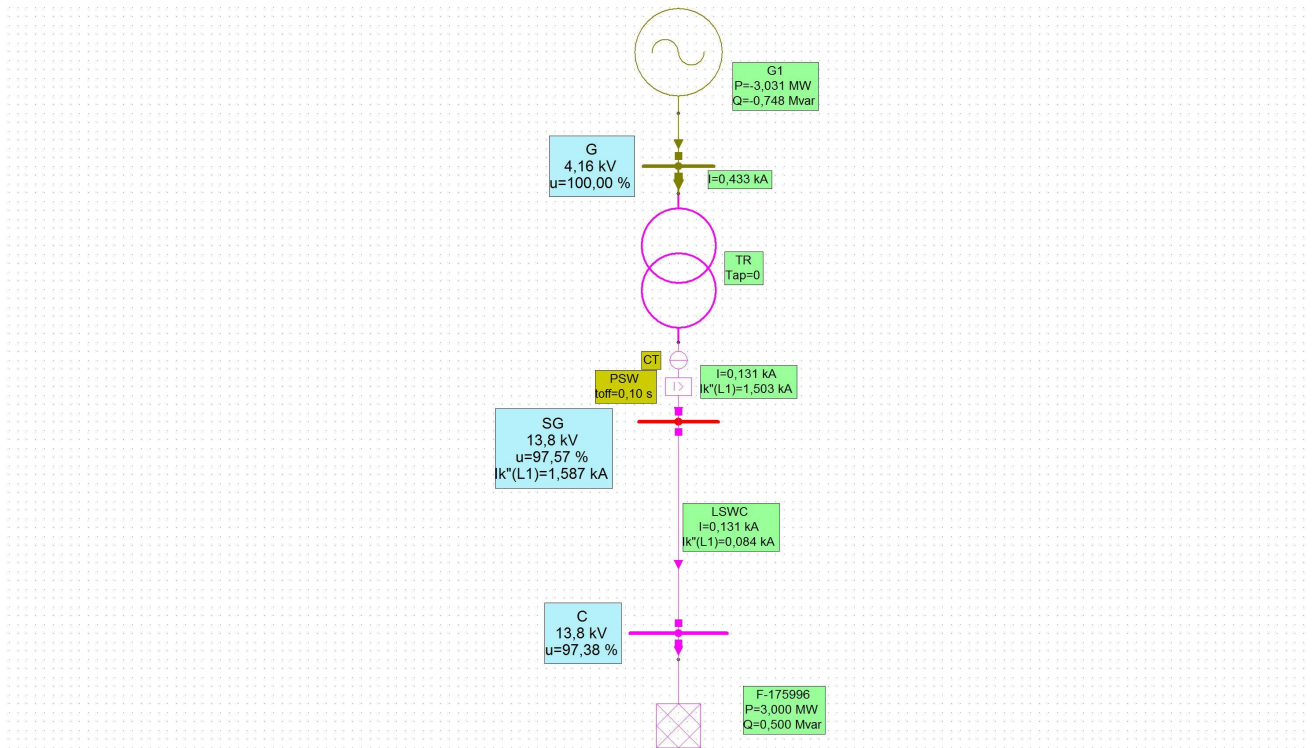


Figura 5.3: Sistema de potencia analizado

### 5.3.1. Interruptores de mantenimiento

Algunos interruptores automáticos de baja tensión, con sistemas de disparo digitales vienen dotados con un sistema que cambia la unidad de disparo a una rápida, para propósitos de mantenimiento, prueba o reparaciones. El disparador más rápido reducirá la energía incidente y los niveles de elementos de protección personal requeridos. Una vez que la tarea se haya desarrollado, el interruptor puede ser puesto en los ajustes normales que provean la mayor protección y coordinación.

### 5.3.2. Respuesta a fallas de flameo por arco

Una vez detectada la falla hay dos opciones de diseño. Una involucra el disparo del interruptor aguas arriba de la falla. Como el tiempo de detección es muy corto, el tiempo total de despeje se reduce al tiempo de operación del interruptor. La segunda opción incluye la creación de una falla trifásica en la barra de manera intencional, energizando un interruptor de tierra de alta velocidad, esto aterriza la falla del arco a través del interruptor de tierra de alta velocidad, entonces las dos fallas son despejadas por el dispositivo de protección que esté aguas arriba. Debido a que los interruptores de tierra se cierran más rápido, que lo que abren los interruptores automáticos, por lo tanto este método será más rápido que el explicado

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Configuraciones

Análisis en encerramientos

Análisis al aire libre

Puesta a Tierra

Con puesta a Tierra

Sin puesta a Tierra

Corrientes de Arco

Corriente de arco plena 1.5065 kA

Corriente de arco reducida 1.2805 kA

Nivel de Tensión 13.8 kV

Distancia al punto de arco 457.2 mm

Corriente de Falla 1.503 kA

Exponente de distancia 0.973 mm

Calcular 1

Tiempo de despeje a la corriente de arco plena 4 s

Tiempo de despeje a la corriente de arco reducida 5 s

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima 38.8564 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima 9.2789 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo 3761.0501 mm

Categoría de Riesgo Categoría del riesgo 3

Tipo Ropa Ropa de algodón debajo de camisa, pantalón v. cobertor

Clase de EPP 2B

Clase de Guantes 2

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.6804	0.1778
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128

Figura 5.4: Resultados del análisis de riesgo a una distancia de 457,2 mm del punto de arco

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Configuraciones

Análisis en encerramientos

Análisis al aire libre

Puesta a Tierra

Con puesta a Tierra

Sin puesta a Tierra

Corrientes de Arco

Corriente de arco plena 1.5065 kA

Corriente de arco reducida 1.2805 kA

Nivel de Tensión 13.8 kV

Distancia al punto de arco 1854.2 mm

Corriente de Falla 1.503 kA

Exponente de distancia 0.973 mm

Tiempo de despeje a la corriente de arco plena 4 s

Tiempo de despeje a la corriente de arco reducida 5 s

Calcular 1

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima 9.9501 J/cm<sup>2</sup>

Energía Incidente Máxima 2.3761 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo 3761.0501 mm

Categoría de Riesgo Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP 1 Clase de Guantes 2

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.8604	0.1778
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128

Figura 5.5: Resultados del análisis de riesgo a una distancia de 1854,2 mm del punto de arco

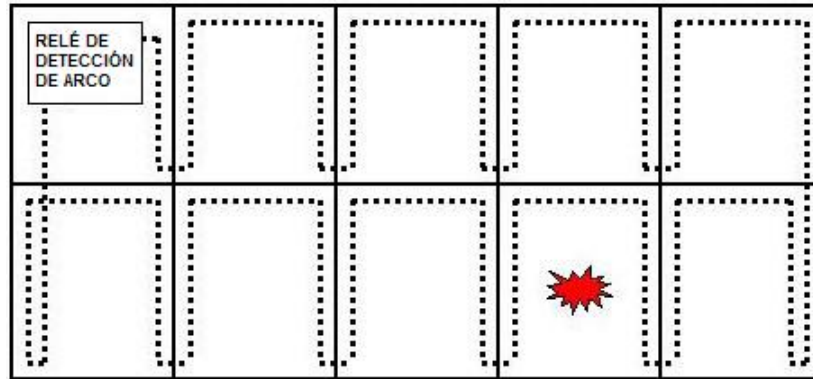


Figura 5.6: Distribución típica de la fibra óptica en tableros de distribución  
Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

anteriormente, sin embargo debido al hecho de que se introduce una segunda falla trifásica el interruptor de tierra debe permanecer en buen funcionamiento. La implementación de este método envuelve costos mas altos que para el primero, lo que lo puede hacer una alternativa no viable.

### 5.3.3. La solución de la fibra óptica

Un método nuevo y novedoso, emplea la fibra óptica como detector del flameo. La fibra óptica puede tener longitudes superiores a los 60 m. Se emplean fibras plásticas con un recubrimiento de vidrio y se distribuyen a través de todos los compartimentos de alta tensión, donde pueda haber peligro potencial de ocurrencia de un arco. La distribución típica de la fibra óptica se muestra en dos tableros de distribución de alta, figura 5.6.

A diferencia de la fibra usada en comunicación, esta no tiene revestimiento que impida la entrada de la luz. De hecho la operación del sistema depende de luz externa. La fibra es una vaina plástica con un centro de vidrio, que la hace adecuada para ambientes hostiles. La curvatura mínima es de alrededor de 2" (5,08 cm) siempre que la fibra sea expuesta a un arco, el rápido incremento de la intensidad de la luz será detectado por el relé. No se necesita de cables galvanizados o fotoceldas en los compartimentos de alta tensión. No es necesario darle vueltas a la fibra, pero es recomendado, si lo hace la continuidad e integridad de la fibra sensora puede ser continuamente monitoreada por el sistema, lo cual se hace enviando un pulso de prueba, el cual si no es recibido a intervalos regulares de tiempo activará la alarma de falla interna del relé. La sensibilidad del relé a la luz puede ser ajustada manualmente o controlada automáticamente. Cuando se ajusta en el modo automático, el pone el umbral de sensibilidad, en los cambios bajos en la intensidad de la luz que puede resultar de aper-

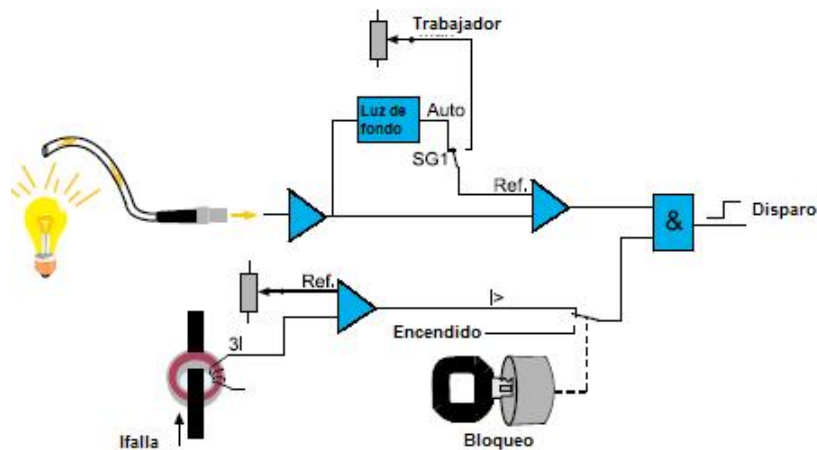


Figura 5.7: Diagrama de bloques de un relé con detección de arco  
Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

tura y cierre de las puertas de los compartimientos. El ajuste manual será mas adecuado donde pueden ocurrir niveles bajos de arco como en los antiguos accionamientos por aire o magnéticos. La figura 5.7 muestra un diagrama de bloques del relé de detección de arco.

Dos salidas rápidas de estado permanente del relé y una de los contactos tipo seco convencionales normalmente abiertos, estarán disponibles para el disparo. El tiempo de operación total de estado permanente y contactos de disparo seco se muestran en la figura 5.8.

La norma [IEEE 1584, 2002], establece que el mayor valor de energía incidente no debe ocurrir a la corriente de falla de contacto. En la figura 5.10 se muestra este hecho, niveles bajos de corriente llevan a tiempos grandes de despeje y por tanto a energías muy altas. El relé de detección de arco se acerca más al disparo instantáneo. Para longitudes mayores a 60 m, se hace necesario de unidades de extensión que conecten el resto de la fibra a la unidad central, por cada 6 m por encima de los 60 m se hace necesario el empleo de una unidad de extensión y se puede llegar hasta una longitud de 1200 m. En la figura 5.9 se muestra una aplicación simple para cubrir con la fibra óptica 4 alimentadores.

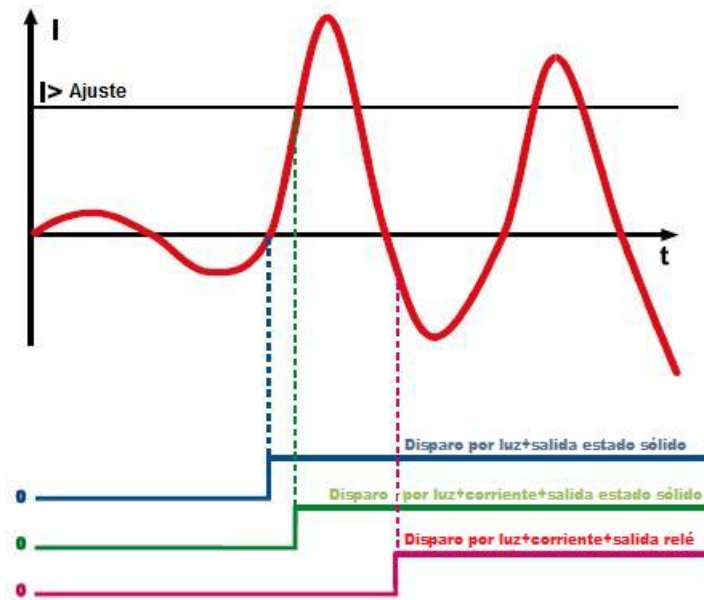


Figura 5.8: Comparación de los tiempos de operación  
 Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

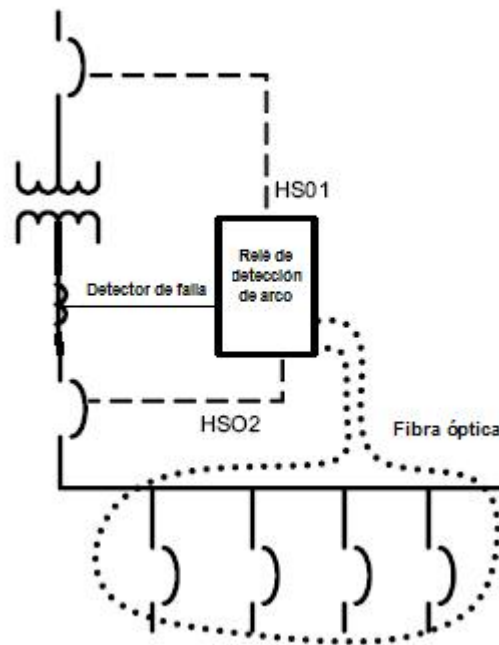


Figura 5.9: Disposición simple de fibra óptica  
 Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

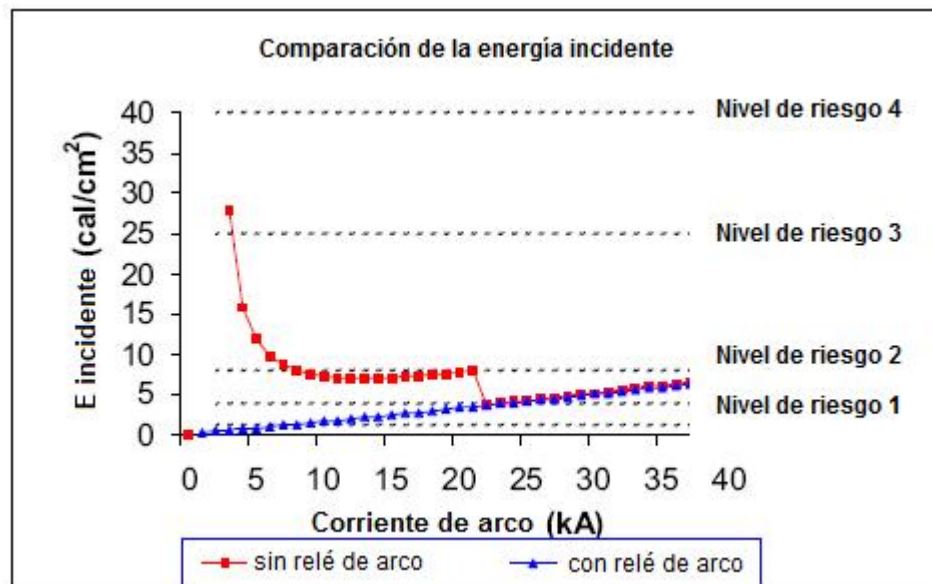


Figura 5.10: Niveles de energía incidente con protección instantánea y de sobrecorriente de respaldo

Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE

# Capítulo 6

## Equipo de protección ante flameo por arco

### 6.1. Introducción

Los aspectos de seguridad de cualquier trabajo o procedimiento, se ven mejorados en gran medida por el uso de elementos de protección personal (EPP). Algunos de los equipos son usados para desarrollo de tareas, como las herramientas aisladas, mientras que otros son usados estrictamente para proteger al trabajador. Cada uno de los equipos protege contra cualquiera o todos los riesgos eléctricos presentes. Los equipos usados para la protección, deben ser diseñados y probados para soportar niveles de tensión y de energía incidente de valores superiores a los cuales puedan estar expuestos. En este capítulo se presentará la ropa protectora y elementos de protección personal, dirigidos a la disminución de los riesgos asociados con la liberación de energía producida durante un evento de flameo por arco; de las características especiales que deben tener; así como las especificaciones que permitan su posterior selección, basados en el estudio de análisis de riesgo ante flameo por arco.

### 6.2. Descripción de elementos y equipos de protección ante flameo por arco

#### 6.2.1. Protección térmica y contra flameo

Debido a la gran cantidad de calor generada durante un arco eléctrico, se requiere que, en caso de que un equipo eléctrico no se haya puesto en una condición eléctrica segura, el trabajador tome precauciones y use protección cuando esté expuesto a potenciales arcos. Los trabajadores deben usar protección térmica y el valor de rendimiento por arco térmico (ATPV), debe ser

superior al valor de energía incidente a la cual el trabajador estará expuesto. El ATPV o  $E_{BT}$  de cualquier material se calcula según los procedimientos de la norma ASTM F1959/F1959M. A continuación se explican las definiciones relacionadas con los requerimientos de la ropa de protección personal:

**Resistente al flameo FR:** toda la ropa se enciende, cuando es expuesta a una fuente suficiente de calor. Cuando se quita la fuente de calor la ropa normal sigue quemándose, la ropa resistente al flameo se puede encender ante la presencia de una fuente de calor, pero al retirarla de esta, la ropa deja de quemarse.

**Valor de rendimiento por arco térmico (ATPV):** fué investigado por Stoll y Chianta, quienes desarrollaron la curva Stoll. La curva se basa en la mínima energía calórica incidente ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ) que causará quemaduras de segundo grado en el humano. Las normas actuales para definir el nivel térmico requerido se basan en las curvas de Stoll, esto es, la ropa que debe ser usada para limitar la quemadura a una de segundo grado.

**Energía de rompimiento  $E_{BT}$ :** algunos materiales resistentes al flameo se vuelven quebradizos cuando se someten a altas temperaturas, la mezcla de esta característica y la fuerza generada por el arco puede ocasionar la falla o ruptura del material. ASTM ha definido este valor, como un promedio de los cinco niveles de energía incidente mas altos, bajo la curva de Stoll, a los cuales el material ha estado expuesto y no ha presentado falla. Como  $E_{BT}$  esta definida para valores por debajo de la curva de Stoll, los trajes hechos de tales materiales, se pueden usar de forma segura donde los niveles de exposición sean menores que  $E_{BT}$ .

#### **6.2.1.1. Ropa resistente al flameo**

**Materiales tratados químicamente.** Las fibras naturales y sintéticas pueden ser tratadas químicamente para convertirse en resistentes al flameo, algunos materiales tienen uso desechable, mientras que otros tratados (con bórax y combinaciones de ácido bórico-sal), pueden durar por toda la vida de la prenda. Las prendas naturales tratadas químicamente, no exhiben un nivel tan alto de ATPV, como las fibras sintéticas cuando se comparan con su peso. Esta diferencia se ha disminuido en los últimos años. Algunas fibras naturales, tratadas químicamente, de gran peso pueden proveer mayor protección contra ciertos materiales fundidos.

**NOMEX III:** fibra de aramida hecha por la compañía DuPont. Este material se espesa y se carboniza cuando se expone al calor. Esta característica única permite al NOMEX brindar una excelente protección térmica. NOMEX ha sido modificado desde que fué introducido. NOMEX IIIA es hecha con fibra antiestática, por lo tanto es la adecuada para ambientes peligrosos, tales como aquellos con altas concentraciones de gas hidrocarbónico.

**Polybenzimidazol (PBI):** es un producto de la corporación Hoelst Celanese, es similar a NOMEX, el PBI, es inflamable, químicamente resistente, estable ante el calor.

**KERMEL:** es una fibra poliamida imida aramida, hecha en Francia por Rhone-Poulenc. La ofrecen únicamente en tejidos mezclados con otras fibras. Como otros materiales sintéticos retardantes de la flama, este material no se derrite cuando se somete al calor.

La tabla 6.1 ilustra las propiedades relativas de varios tipos de materiales, la información de la tabla se ha sacado de la experiencia en la industria y/o experimentos de los productores.

#### **6.2.1.2. Trajes de protección contra flameo**

Un traje de protección contra flameo, es una prenda protectora térmica, hecha de materiales pesados como NOMEX, PBI u otros materiales resistentes al flameo. Estos trajes están formados como mínimo por dos partes, el protector de la cara y la chaqueta resistente al flameo. Los trajes de protección para niveles de energía por encima de los 40 cal/cm<sup>2</sup>, deberán incluir protección para los miembros inferiores. Si no se usan pantalones FR, la chaqueta debe ser suficientemente larga para proteger las piernas. Estos trajes deben ser usados siempre que el electricista trabaje dentro del límite de protección contra flameo. El traje se debe seleccionar con un ATPV o E<sub>BT</sub>, suficientemente superior a la máxima energía incidente que se pueda generar en la zona de trabajo. Los trajes de protección contra flameo se deben usar en combinación con la adecuada protección de ojos, manos y cabeza. Todos los trabajadores que estén en las cercanías del punto de posible arco, deben usar trajes de protección.

#### **6.2.1.3. Cuidado y guía de uso de la ropa protectora**

- No se debe usar si está impregnada con grasa o líquidos inflamables.
- Lavar de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Generalmente el lavado con agua caliente y detergente será suficiente.

Tabla 6.1: Propiedades relativas de varios tipos de tejidos

Nombre genérico	Fibra	Fabricante	Absorción	Tenacidad	Características
Aramida (meta)	NOMEX	DuPont	5,5	4 - 5,3	No se derrite, resistencia química y a abrasión
Aramida (para)	KEVLAR	DuPont Akzo	4,3	21 - 27	Resiste altas temperaturas y abrasión, sensible al Cl
Aramida (para)	TWARON	Países bajos	4	22,6	Resiste altas temperaturas y a abrasión, sensible al Cl
Aramida (para)	Technora	Teijin (Japón)	4	22,6	Resiste altas temperaturas y a abrasión, sensible al Cl
Poliamida imida	KERMEL	Rhone-Poulenc	5	4 - 4,5	Estabilidad térmica, resistencia química, a abrasión y a la luz
Basofil	BASOFIL	BASF	5	2	Resistente a solventes, resistente a ácidos
Modacrílico	Protex	Kaneka	2,5	1,7 - 2,6	Resistencia química y a la abrasión, no encoje
Acrílico FR	Super Valzer	Mitsubishi	2,5	1,7 - 2,6	Resistencia química, a la abrasión, encoje
PBI	PBI Gold	Celanese	15	2,8	Resistencia química, a la abrasión, encoje
Polimida	P84	Imitech(Austria)	15	2,8	No se derrite, resistencia química, solo colores oscuros
Viscoso FR	Rayón FR	Lenzing	3	4,3	Encoje, inferior al NOMEX
Algodón FR	Algodón FR	Natural	8	2,4 - 2,9	Similar al algodón
Vinal	VINEX	Westex	3	3	Resistente a la abrasión, baja resistencia a ácidos
Vinal	FR9B	Westex	3	3	Resistente a la abrasión, baja resistencia a ácidos
Poliéster FR	TREVIRA	Trevira	0,4	4,5	Derrite a 9 °C menos que el poliéster
Poliéster FR	Poliéster FR	Trevira	0,4	4,5	Derrite a 9 °C menos que el poliéster
Poliamida	Nylon	DuPont	6	6 - 8	Más confortable que el algodón
Poliamida	Nylon	Monsanto	6	6 - 8	Más confortable que el algodón

Fuente: Electrical safety handbook



Figura 6.1: Traje de protección contra flameo en NOMEX con ATPV de 75 cal/cm<sup>2</sup>  
Fuente: Flashfireclothing

- No mezcle prendas resistentes al flameo con prendas de otros materiales en el mismo lavado.
- No use blanqueadores u otros tratamientos a menos que sean recomendados por el fabricante.
- Recuerde que el lavado puede degradar el tratamiento químico de algunos materiales retardantes del flameo. Tenga en cuenta las indicaciones del fabricante. De la cantidad de lavadas depende la vida útil de la prenda.
- Inspeccione la prenda antes de cada uso. Si está contaminada con material inflamable o dañada de alguna manera, se debe limpiar o reemplazar si se requiere.

### 6.2.2. Protección de cabeza y ojos

El casco debe proveer protección contra la caída de objetos y aislamiento, los cascos deben cumplir con la norma ANSI Z89.1, la cual clasifica los cascos en tres clases básicas:

1. Clase G: reducen la fuerza de impacto por la caída de objetos y reducen el peligro por contacto con conductores desnudos de baja tensión 2200 V de fase.
2. Clase E: reducen la fuerza del impacto por la caída de objetos y reducen el riesgo por contacto con conductores eléctricos desnudos de hasta 20000 V de fase.

3. Clase C: reducen la fuerza de impacto por caída de objetos. No ofrecen protección eléctrica.

#### **6.2.2.1. Gafas de seguridad**

La nube de plasma y el material fundido creado por un arco eléctrico, se proyecta a alta velocidad por la explosión. Si el plasma o material fundido entra en los ojos, la temperatura extrema puede causar lesiones y posiblemente ceguera permanente. Los electricistas expuestos a la posibilidad de arco eléctrico y a la explosión generada por este, se deben equipar y usar protección para los ojos, la cual debe cumplir los requerimientos de la norma Z87.1. Además esta protección no debe ser conductora cuando se use para protección contra el arco y por las explosiones generadas por este.

Uso y cuidado: se debe usar durante todo el tiempo que haya la posibilidad de explosiones por arco eléctrico. Esta protección se debe limpiar antes de cada uso. Paños suaves y agua tibia por lo general ofrecen la acción de limpieza necesaria, sin embargo algunos fabricantes suministran materiales de limpieza para sus aparatos específicos.

Situaciones en las que se requiere el uso de este tipo de protección:

- Trabajos cerca a líneas energizadas expuestas.
- Trabajos cerca a celdas, donde haya conductores eléctricos energizados.
- Siempre que se recomiende el uso del traje de protección contra flameo.
- Cuando alguna de las normas locales, o internacionales reconocidas, requieran el uso de esta protección.
- Todas las veces que haya riesgos asociados con el arco eléctrico.

#### **6.2.3. Protección de las manos**

La protección de las manos consta de dos partes un guante de plástico y otro de cuero, el guante de cuero esta por encima del guante de plástico y protege al guante de plástico de daños por esfuerzos mecánicos, mientras que el guante de plástico brinda el aislamiento dieléctrico necesario. Algunas veces, el guante de plástico tiene una cubierta de algodón que absorbe el sudor y hace el uso de los guantes mas comfortable.



Figura 6.2: Gafas de protección  
Fuente: Mine safety appliances company

Tabla 6.2: Clases de guantes de protección

Clase	$V_{max}$	$V_{AC\ rms}$	$V_{DC}$
00	500	2500	10000
0	1000	5000	20000
1	7500	10000	40000
2	17000	20000	50000
3	26500	30000	60000
4	36000	40000	70000

Fuente: Electrical safety handbook

Normas de construcción de ASTM:

1. **Norma D 120:** establece los requerimientos técnicos de los guantes de plástico.
2. **Norma F 696:** Establece los requerimientos técnicos de los protectores de cuero.
3. **Norma F 496:** especifica los cuidados de los guantes que están en servicio.
4. **Norma F 1236:** es una guía para la inspección visual de guantes, mangas y otros equipos con aislamiento de plástico.

Los guantes de caucho están disponibles en cuatro clases básicas de tensiones desde la 00 a la clase 4 y dos tipos diferentes tipos I y II. La tabla 6.2 muestra cada clase y su máxima tensión de uso, así como las tensiones rms y DC empleados para probar los guantes.

### 6.2.3.1. Técnicas de inspección de guantes

Inicialmente se revisa la superficie del guante rodando suavemente entre las manos, las áreas tanto de adentro como de afuera del guante. Esta técnica requiere apretar suavemente la

superficie interna del guante, curvando la superficie externa y causando el estiramiento necesario para poder visualizar cortes, rotos y otras irregularidades. Cuando se haya revisado la totalidad de la superficie externa de esta manera se voltea el guante y se realiza el mismo procedimiento con la superficie interna. Cuando sea necesario se hace una inspección más cuidadosa de las áreas sospechosas, lo cual se puede lograr apretando cuidadosamente y deslizando el guante entre los dedos. Recomendaciones: nunca deje un guante volteado, estire las zonas entre el pulgar y los demás dedos y revise cuidadosamente en busca de irregularidades.

#### **6.2.4. Herramientas aisladas**

Tienen una cubierta completa de material aislante, solo una mínima cantidad metálica de superficie de trabajo, se deja descubierta. Estas herramientas previenen el choque eléctrico o el arco en caso de que el trabajador toque conductores energizados. La norma ASTM 1505 define los requerimientos de manufactura y prueba de herramientas aisladas manuales. Tales herramientas son usadas en circuitos de 1000 V AC y 1500V DC. Estas herramientas están cubiertas por dos capas de material, la capa interna provee el aislamiento eléctrico y la capa externa, la protección para la capa de aislamiento interno. Estas herramientas se deben usar siempre que se realicen trabajos cerca o en conductores energizados y se deben inspeccionar antes de cada uso. Se deben usar de la misma manera que usan las demás herramientas manuales, evitando el uso de estas herramientas en aplicaciones donde pueda ocurrir daño en el aislamiento.

#### **6.2.5. Barreras temporales de advertencia**

Los símbolos de advertencia deben tener un diseño normalizado y deben ser fáciles de leer. Se deben colocar en sitios donde sean fácilmente vistos y donde se pueda leer desde todos los puntos de acceso a las áreas de riesgo.

Barreras de advertencia temporales: se debe usar la cinta de peligro bajo el siguiente procedimiento

1. Se debe poner de forma que encierre totalmente el área de riesgo.
2. La cinta debe ser visible desde todos los puntos posibles de acercamiento.

3. Debe tener una altura para que actúe como una barrera, aproximadamente 3 pies (91,44 cm).
4. Se debe permitir que el área del encerramiento sea lo suficientemente grande, de forma que no haya riesgo para el personal externo.
5. Si se está, empleando equipos de prueba dentro del área delimitada, la cinta debe permitir la manipulación del equipo desde afuera.
6. No use cinta con el mismo color y estilo para otro propósito distinto al de hacer barreras de advertencia temporales.
7. El área encerrada debe ser considerada como un encerramiento metálico, eso es si el acceso es posible.
8. Después de que el riesgo ha sido eliminado, retire la barrera.

### 6.2.6. Dispositivos de bloqueo y etiquetado

Son dispositivos empleados para asegurar y marcar el equipo que este fuera de servicio. Se instalan de forma que el equipo no pueda ser reenergizado sin primero remover el dispositivo de bloqueo/etiquetado.

#### 6.2.6.1. Etiquetas de seguridad

Se aplican al equipo para indicar que está fuera de servicio. Estas etiquetas se construyen con material durable y resistente al ambiente. Deben ser de construcción normalizada y deben incluir advertencias que digan: no enciender, no abrir, no operar, no cerrar u otra advertencia. La etiqueta también debe indicar quien la instaló y la naturaleza del problema con el equipo. Las etiquetas se deben aplicar usando fuertes sostenedores. El cable con envoltura de Nylon, está disponible para estas aplicaciones. El sostenedor debe tener una carga de ruptura no menor a 50 lb (22,68 kg). En la figura 6.3 se muestran diferentes etiquetas.

#### 6.2.6.2. Dispositivos de bloqueo

Se emplean para prevenir la operación de equipos que han sido desenergizados. Deben tener la suficiente fuerza para soportar los esfuerzos que busquen removerlo sin la llave adecuada. Si el bloqueador puede ser removido por otros medios diferentes a la llave que se ajusta a el, este no debe ser empleado. Comunmente se emplean dispositivos normalizados y cada



Figura 6.3: Etiquetas usadas con los dispositivos de bloqueo  
Fuente: Electrical safety handbook

empleado debe tener un juego de bloqueadores que pueda ser abierta solo por sus llaves. Se debe tener una llave maestra, para situaciones de emergencia, en las que sea necesario que el dispositivo sea abierto por una persona diferente a quien lo instaló. Por departamentos deben tener grupos de dispositivos de bloqueo que sean colocados por personal de cambio y los cuales deben estar codificados con una clave por departamento. Un equipo puede ser removido del servicio durante un cambio y después retornado al servicio en otro cambio. En tal caso, los dispositivos son instalados por una persona y retirados por otra. Este grupo de dispositivos debe tener llaves maestras, de forma que cualquier personal de cambio autorizado pueda colocarlos o removerlos.

1. **Dispositivos multibloqueo:** se emplea cuando se necesita poner un bloqueador en una parte del equipo. Esto ocurre cuando se desarrollan gran variedad de tareas en el sitio donde se instaló el dispositivo. Bajo estas circunstancias, se usa el dispositivo multibloqueo. Para bloquear una pieza de equipo se abre el dispositivo y se inserta a través de uno de sus huecos en la pieza del equipo. El candado previene la apertura del dispositivo multibloqueo que a su vez previene la operación del equipo. En la figura 6.4 se muestran diferentes tipos de dispositivos multibloqueo.
2. **Dispositivos de bloqueo especiales:** algunos equipos como interruptores automáticos y otros interruptores no se acomodan a los dispositivos anteriores, por lo tanto es necesario un dispositivo especial. El dispositivo se instala a través de un hueco dejado para tal propósito. El interruptor no puede operar hasta que el dispositivo sea removido y este a su vez no puede ser removido, hasta que se remueva el seguro.



Figura 6.4: Dispositivos multibloqueo  
Fuente: Electrical safety handbook

### 6.2.7. Pértigas aislantes

Las pértigas son extensiones hechas de material aislante, que tienen herramientas en sus extremos lo que le permite a los trabajadores manipular conductores y equipos energizados, desde una distancia segura. Las pértigas aislantes varían en longitud dependiendo del nivel de tensión y el trabajo desarrollado. Las pértigas modernas se elaboran con fibra de vidrio o con resina epoxi. Los diseños antiguos eran hechos con madera tratada y pintada con químicos para hacerla resistente a la humedad y a la temperatura. En la figura 6.5 se muestra una pértiga con su herramienta en el extremo para la operación de interruptores de desconexión al aire libre. A las pértigas se les puede adaptar gran cantidad de herramientas e instrumentos. El accesorio más común es el normalizado NEMA que se muestra en la figura 6.7. En la figura 6.6 se muestra un detector de tensión unido a una pértiga. En la figura 6.7 también se muestran otros accesorios y extensiones que pueden aumentar la utilidad de las pértigas. En adición a los equipos, las pértigas también se pueden equipar con destornilladores, cortafríos y otras herramientas de esta clase. Las pértigas pueden ser de tipo telescópica, que se componen de varias secciones tubulares, las cuales están unas dentro de otras, la sección más larga primero se extiende y luego se bloquea permitiendo la realización de trabajos, el usuario de la pértiga puede extender las secciones requeridas para la realización de la tarea.

La figura 6.7 muestra una pértiga con varias secciones y herramientas. Este tipo de paquetes



Figura 6.5: Pértigas aislantes  
Fuente: AMC instruments

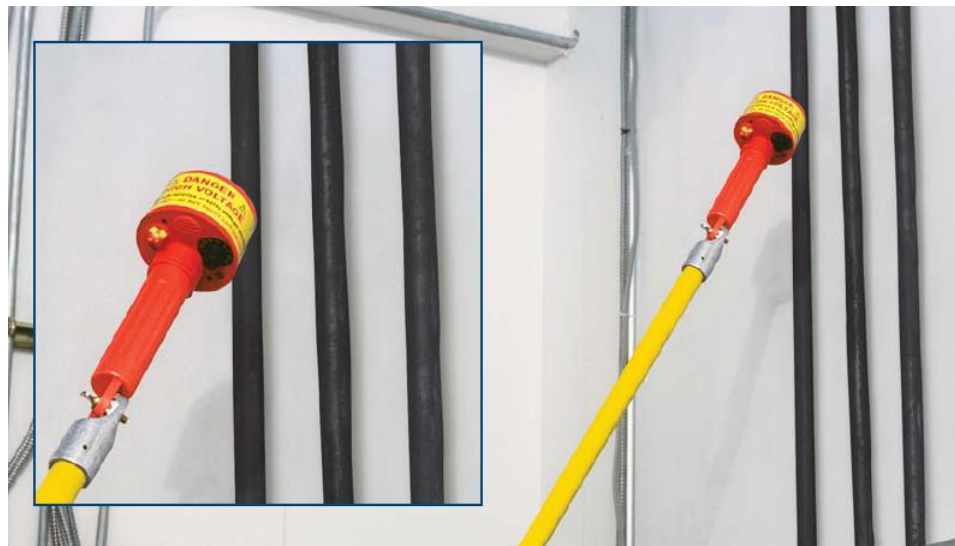


Figura 6.6: Detector de tensión unido a una pértiga aislante  
Fuente: AMC instruments

Tabla 6.3: Procedimientos típicos que requieren el uso de pértigas aislantes

Media y alta tensión	Todos los niveles de tensión
Medición de tensión	Operaciones de desconexión y corte
Reparaciones o modificaciones en equipo eléctrico energizado	Instalación de puestas a tierra de seguridad

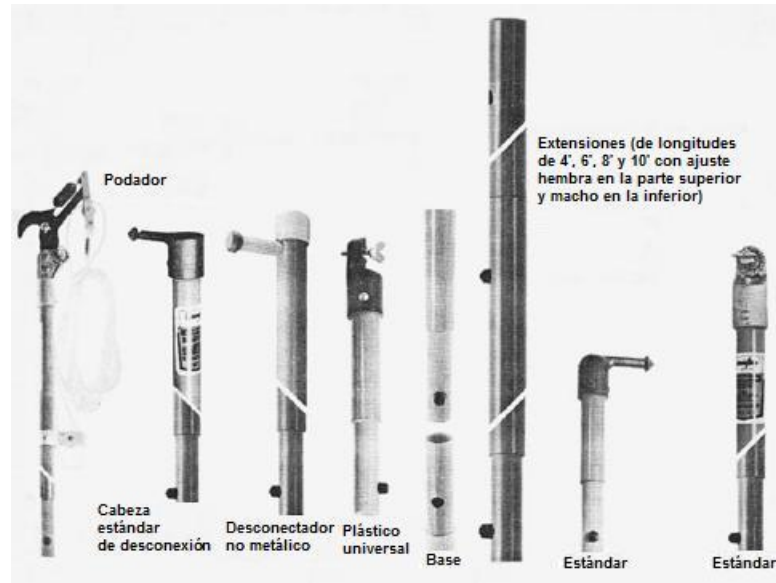


Figura 6.7: Secciones y herramientas de las pértigas  
Fuente: Electrical safety handbook

ofrece varias configuraciones que se ajustan a la mayoría de las tareas diarias de un electricista en el trabajo en líneas. El paquete contiene:

1. Seis secciones de 4' (122 cm) de resina epoxi.
2. Cabeza de desconexión en aluminio para la apertura y cierre de interruptores y cortacircuitos.
3. Cabeza de desconexión no-metálica para uso en interior de subestaciones donde hay barrajes e interruptores en las proximidades.
4. Cabeza con abrazadera para la desconexión de las puestas a tierra de seguridad.
5. Podador.
6. Cortador.

#### 6.2.7.1. Cuando usar las pértigas aislantes

Se usan, cuando sea necesario aislar al electricista del riesgo por contacto directo o del riesgo ante un evento de flameo por arco. La energía incidente que recibe un trabajador, es inversamente proporcional a la distancia al punto posible de arco, por tanto el uso de esta herramienta es de gran ayuda en la disminución de la energía incidente. Ver tabla 6.3.

**6.2.7.2. Formas de uso**

Como usar la pértiga específica depende de la tarea que se este desarrollando y la posición en la que el trabajador se encuentre. Como regla general, en conjunto con el uso de las pértigas aislantes se debe usar la ropa protectora. Como mínimo, guantes de caucho y protectores faciales, sin embargo, algunos recomiendan también el uso de trajes de protección contra flameo, especialmente cuando se hayan puesto las tierras de seguridad. Antes de cada uso, la pértiga se debe revisar cuidadosamente en busca de daños físicos que puedan afectar su nivel de aislamiento. Si la pértiga está quebrada o tiene alguna fisura o algún daño similar, se debe retirar del servicio. Los requerimientos de prueba de la norma ASTM F 711 le exigen a los productores de las pértigas, que estas cumplan con altas exigencias antes de ser vendidas. Adicionalmente OSHA requiere que las pértigas sean inspeccionadas y/o probadas periódicamente. Los requerimientos mínimos exigen que:

1. Las pértigas se deben inspeccionar cuidadosamente en busca de defectos o daños, antes de cada uso o como mínimo cada dos años.
2. Si se encuentra algún daño la pértiga debe ser reparada o remplazada.
3. Las pértigas se deben probar de acuerdo con la norma ASTM F 711, cada vez que la inspección revele daño o defecto o cada dos años.

**6.2.8. Señales de advertencia ante flameo por arco**

La instalación de las señales de advertencia ante flameo por arco, es uno de los pasos mas críticos, después de la realización e implementación del análisis de riesgos ante flameo por arco. Antes de determinar el contenido, la cantidad y el lugar donde van a ser instaladas las señales, se debe definir el método de cálculo, para estimar el riesgo. Cuando los valores de energía incidente, reportados en las señales de advertencia, sean los de los casos mas desfavorables, el personal calificado debe usar, de acuerdo con las consideraciones de la señal de advertencia, el respectivo sistema de protección. Algunos sistemas de potencia pueden tener un riesgo alto debido a maniobra de interruptores, solo durante un periodo breve de tiempo, por ejemplo una hora del año, el resto del tiempo las condiciones de seguridad son normales. Cuando las señales de advertencia, corresponden a la configuración infrecuente mostrando un alto nivel de energía incidente, pero durante la operación normal, el nivel de energía es mucho mas bajo, el personal usará elementos de protección personal de un nivel superior al requerido. Una solución a este problema, es crear señales específicas para la

condición normal de operación, asegurándose en el entrenamiento del personal, que cuando el sistema no esté en operación normal, el trabajador se refiera al reporte del análisis de flameo por arco. Por lo tanto, los cálculos se deben hacer para las dos condiciones de operación [Wallace y otros, 2007].

#### **6.2.8.1. Requerimientos mínimos en el contenido de las señales de advertencia**

En la norma [NFPA 70, 2004] en la sección 110.16, se estipula la instalación de las señales de advertencia de riesgo de flameo por arco, pero esta sección, no especifica el contenido de la señal, solo dice que los señales deben tener advertencias, sobre potenciales flameos por arco eléctrico. En esta sección se hacen varias propuestas, pero la decisión del contenido incluido en la señal, la toma el ingeniero encargado de la seguridad.

Con la flexibilidad que hay en referencia al contenido de las señales de advertencia ante flameo por arco, se debe ser cuidadoso, con la información proveida por las mismas. Las señales generales de advertencia ante flameo por arco, cumplen con los requerimientos mínimos, pero no proveen información sobre la cuantificación del riesgo. Una persona calificada debe estar en capacidad de determinar los riesgos y las limitaciones asociadas con el trabajo que esté realizando. La energía incidente y el límite de protección contra flameo se incluyen dentro de estas aptitudes. Si la señal de advertencia, no muestra esta información, la persona calificada debe cuantificar los riesgos y el límite de protección, usando un método de cálculo aprobado o debe poder interpretar estos datos, de documentación previa, que contenga los cálculos, para el sitio en cuestión.

La información de los símbolos debe ser seleccionada de forma que refleje las políticas y procedimientos de seguridad de la instalación en cuestión. No se deben diseñar para remplazar o duplicar el contenido de las políticas de seguridad.

- Ubicación o nombre de la barra. Cuando las señales de advertencia van mas allá de los requerimientos mínimos y muestran información correspondiente a cálculos específicos, se debe asegurar su correcta ubicación en la instalación. La identificación de la ubicación, debe ser idéntica a la usada para identificar las barras en el reporte asociado con el análisis de riesgo, de forma que las señales aplicadas tengan relación directa con los cálculos.
- Categoría del riesgo. Cada cálculo de flameo por arco determina una energía incidente y la categoría del riesgo correspondiente a esta energía. Estas categorías dan al personal calificado una guía, acerca del nivel adecuado de elementos de protección personal que se deben usar. Esta categoría, debe ser incluida dentro del símbolo de advertencia.

- Límite de protección contra flameo. El límite de protección contra flameo, define la distancia desde las partes energizadas expuestas, dentro de la cual el personal calificado, debe usar los elementos de protección personal apropiados. Este límite se debe mostrar en la señal de advertencia, de forma que el trabajador no necesite realizar este cálculo, cada vez que necesite acceder al sitio.
- Nombre del dispositivo de protección. El nombre del dispositivo de protección se debe mostrar, para facilitar la ubicación de la señal de advertencia. La señal de advertencia se debe colocar en la ubicación específica, de la barra donde está el dispositivo de protección. El nombre de este dispositivo de protección, debe hacer referencia particularmente a la ubicación del interruptor de mantenimiento, que se debe activar antes de acceder al equipo. Es importante tener en cuenta, que el dispositivo mostrado en la señal de advertencia, puede no hacer referencia al dispositivo de protección mas cercano. La persona calificada debe estar en capacidad de reconocer el dispositivo, al que se hace referencia en la señal de advertencia.
- Energía incidente. La energía incidente calculada se debe mostrar en la señal, relacionada con la distancia a la cual se calcula. La categoría del riesgo, que también se debe incluir en la señal, corresponde a un rango de energías. Por ejemplo el riesgo de categoría 2, corresponde a un rango de energía entre 4 y 8 cal/cm<sup>2</sup>. Como una guía, [NFPA 70E, 2004] sugiere que para una categoría de riesgo dada, corresponde un nivel mínimo de requerimientos de los elementos de protección personal, especificados con el límite superior, del rango asociado de energías. Sin embargo, se permite cierta flexibilidad y cuando se muestra el nivel de energía incidente, se pueden seleccionar los requerimientos de los elementos de protección personal, de acuerdo con este. Por ejemplo, si el nivel de energía mostrado es de 5,3 cal/cm<sup>2</sup>, se pueden elegir elementos de protección personal suficientes para 6 cal/cm<sup>2</sup>. Si no se muestra la energía real, sino el rango de energía, no se tiene otra opción que escoger los elementos de protección personal, por el límite superior de este rango.
- Información sobre riesgos por electrocución. La información sobre riesgos por electrocución se puede mostrar en las señales de riesgo ante flameo por arco, en diversas aplicaciones. Sin embargo, no es requerida o deseada en los símbolos de riesgo de flameo por arco por dos razones. La primera razón es que el riesgo de electrocución y el riesgo de flameo por arco, no están directamente relacionadas con las mismas variables. El flameo por arco se calcula con base en la corriente de falla y el tiempo de despeje específico, de un dispositivo de protección, mientras que el riesgo por electrocución, se basa

en la tensión y la ubicación del sitio de trabajo. La segunda razón es que para poder detallar las informaciones de ambos riesgos, el tamaño de las letras de cada símbolo sería reducido de manera significativa, haciéndolos mas difíciles de leer. Si se requiere el uso de símbolos de riesgos por electrocución, se sugiere que la información se muestre por separado.

- **Distancia de trabajo.** Los cálculos de energía incidente se deben dar para las distancias de trabajo recomendadas, en [IEEE 1584, 2002]. Es buena práctica, proveer valores de energía incidente a distancias de trabajo adicionales en reporte del estudio, pero para propósitos de la señal de advertencia se acostumbra a dar valores de energía incidente, para las distancias típicas de trabajo enumeradas en [IEEE 1584, 2002]. Las distancias pueden ser cambiadas de las típicas a específicas si se requiere.
- **Ajustes implementados.** Se recomienda que la señal incluya una forma de saber si los ajustes recomendados por el estudio de análisis de riesgo ante flameo por arco fueron implementados. Este espacio puede contener, la fecha de implementación y las iniciales de la persona que lo implementó.

#### **6.2.8.2. Casos especiales en los símbolos de advertencia de riesgo de flameo por arco**

- **Dispositivos de protección con ajustes múltiples.** Cuando un dispositivo de protección, se pueda operar con varios ajustes, se recomienda poner en la señal, los riesgos asociados con todas las posibles configuraciones de ajustes. Por ejemplo si un interruptor de mantenimiento se instala para tener tiempos de despeje mas rápidos en determinado lugar, el riesgo cuando este interruptor no esté operando será mayor. Es importante informar al personal calificado, de los sitios donde se emplea esta clase de interruptores y advertir de los riesgos que existen en caso de no emplearlo. Notas similares son útiles cuando hay presencia de relés con múltiples grupos de ajuste.

#### **6.2.8.3. Cantidad de señales de advertencia de riesgo de flameo por arco**

Es una práctica común colocar una señal de advertencia por cada sitio estudiado. Esta señal de advertencia, por lo general se ubica en el dispositivo de protección principal. La señal, debe tener suficiente información que describa completamente los equipos del sitio. El personal calificado, es responsable de aplicar esta información en el desarrollo de sus tareas. Sin embargo algunas veces, se pueden poner las señales de advertencia en cada compartimiento

del equipo, evitando así la búsqueda del símbolo de advertencia, en el dispositivo de protección principal. Las desventajas de este método es que gran número de señales de advertencia pueden llevar a sobrecostos innecesarios. También puede llevar a la idea errónea de que todos los compartimentos tienen el mismo riesgo, cuando en realidad tienen diferentes niveles de riesgo.

### 6.2.8.4. Impresión y aplicación de las señales de advertencia

- Materiales de impresión y aplicación. Se debe prestar especial atención a la calidad y durabilidad de los materiales usados en la fabricación de las señales de advertencia. Para ambientes limpios y resguardados, con señales hechas con impresoras láser o de inyección de tinta puede ser suficiente. Para ambientes directamente expuestos a la luz solar, lluvia, solventes, aceites y otros químicos, se debe usar vinilo de alta adhesión y las señales deben ser hechas con una impresora de transferencia térmica. Dependiendo de la impresora seleccionada se puede requerir de la laminación para protegerlo contra daños.
- Instalación de las señales. La recomendación general en cuanto a la instalación de las señales de advertencia, es ubicarlas lo mas cerca posible al dispositivo de protección principal, a una altura sobre el nivel del piso, que permita la visibilidad por todo el personal. Es importante que la ubicación de las señales sea normalizada en toda la instalación, de manera que el personal calificado, esté en capacidad de encontrar rápidamente las señales de advertencia, en caso de que tenga que ejecutar alguna tarea.

En la sección 110.16. de [NFPA 70, 2004] se hace referencia a la norma ANSI Z535.4. La norma ANSI Z535.4 se emplea para la elaboración de las señales de advertencia. En la figura 6.8 se muestran ejemplos de estas señales.

En la figura 6.9 se observa una señal de advertencia para la prevención de los accidentes ante posibles flameos por arco.

En la figura 6.10 se observa una señal de advertencia para la prevención de los accidentes ante posibles flameos por arco.



Figura 6.8: Señales de advertencia según ANSI Z535.4  
Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

 <b>ADVERTENCIA</b> 	
<b>Peligro de flameo por arco y electrocución</b>	
<b>Se requiere uso de EPPs adecuados</b>	
<b>55 cm</b> <b>6.62 J/cm<sup>2</sup></b>  <b>Clase 1</b> <b>480 VAC</b> <b>00</b> <b>110 cm</b> <b>30.5 cm</b> <b>2.54 cm</b>	Límite de protección contra flameo Riesgo de flameo a 48 cm  Pantalón y camisa FR Riesgo electrocución al abrir cobertor Clase de los guantes Límite seguro Límite restringido Límite prohibido
<b>Barra: B      Prot: CB ATS-2 N</b>	
Espacio para identificación de la empresa	
<b>Trabajo#: 3001</b>	<b>Preparado a: 27/08/2008</b>
<b>Advertencia: cambios en los ajustes de los equipos o en la configuración del sistema invalidarán los valores calculados y los requerimientos de los EPPs</b>	

Figura 6.9: Señal de advertencia para la prevención de los accidentes de flameo por arco  
Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

		<b>PELIGRO</b>		
<b>NO EPP DISPONIBLES</b>				
<b>TRABAJOS ENERGIZADOS PROHIBIDOS</b>				
<b>8.5 m</b>		<b>Límite de protección contra flameo</b>		
<b>144 cal/cm<sup>2</sup></b>		<b>Riesgo de flameo a 0.48 m</b>		
<b>Peligro:iii</b>		<b>No se encontró clase de protección</b>		
<b>480 VAC</b>		<b>Riesgo electrocución al abrir cobertor</b>		
<b>00</b>		<b>Clase de los guantes</b>		
<b>1.07 m</b>		<b>Límite seguro</b>		
<b>0.3 m</b>		<b>Límite prohibido</b>		
<b>0.025</b>		<b>Límite prohibido</b>		
<b>BARRA: MDS PROT: MDS_PR</b>				
<b>ESPACIO PARA IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA</b>				
<b>Trabajo#: 3002-1</b>		<b>Preparado a:</b>		<b>28/08/2008</b>
<b>Advertencia: cambios en los ajustes de los equipos o en la configuración del sistema invalidarán los valores calculados y los requerimientos de los EPPs</b>				

Figura 6.10: Señal de advertencia para la prevención de accidentes de flameo por arco  
Fuente: Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005

## 6.3. Selección de elementos de protección personal y ropa protectora

Este análisis de riesgo ante flameo por arco, provee la estimación de la energía incidente, la cual se emplea para determinar cual de las rutinas de trabajos realizadas por el electricista, necesita el uso de ropa resistente al flameo o cual de ellas pueda necesitar aun más protección, como sistemas resistentes al flameo de múltiples capas. El análisis de riesgo ante flameo por arco consta de dos pasos principales:

1. Estimación de la energía incidente potencial en el lugar de trabajo.
2. Selección la ropa protectora adecuada para la protección del trabajador.

La finalidad del estudio de análisis de riesgo ante flameo por arco, es minimizar los riesgos a los que un trabajador pudiera estar expuesto ante un eventual flameo por arco, las lesiones mas importantes ocurren por quemaduras, debidas a la liberación de calor del arco. Una de las formas de protección consiste en la selección adecuada de la ropa protectora, la cual se hace basada en tablas que son el resultado de pruebas realizadas por ASTM, sobre diversos tipos de tejidos para estimar su nivel de protección, ante el calor generado por el flameo por arco.

Las quemaduras por arco mas serias ocurren, cuando ropa sin tratamiento se enciende durante un evento de arco. Esto se debe al incremento de área del cuerpo quemada, como resultado del aumento del tiempo de exposición, que resulta de la ropa quemándose. El comité ASTM F18.65 ha desarrollado un método de prueba, que usa arcos monofásicos para determinar el nivel de ignición de tejidos usados en trajes para trabajadores expuestos a los riesgos del flameo por arco. El método de prueba ASTM F1958, determina el nivel de ignición de materiales textiles, en capas sencillas o múltiples. Cincuenta camisetas de tejidos de diferentes fábricas se montan en un maniquí, instrumentado con calorímetros y se exponen al arco para determinar el nivel de ignición. Los tejidos de algodón mas pesados, con alto contenido de humedad (transpiración), y tejidos de algodón de colores suaves, requieren de una energía incidente mas alta, es decir tienen un nivel de ignición mas alto. Contrariamente tejidos de algodón menos pesados y colores mas oscuros requieren menos energía para la ignición. La tabla 6.4 que resume la probabilidad de ignición como una función de los niveles de energía incidente, para una variedad de tejidos de algodón. El peso de los tejidos se mide en gramos por metro cuadrado ( $\text{g}/\text{m}^2$ ). La alta variabilidad debida a los movimientos en el arco en accidentes reales de arco pueden reducir la energía incidente requerida para el 1% de probabilidad de ignición.

Tabla 6.4: Energía incidente vs probabilidad de ignición en tejidos sin tratamientos

Probabilidad de Ignición	1 %		10 %		50 %		90 %	
	Media	L95 %	Media	L95 %	Media	L95 %	Media	L95 %
Descripción y peso (g/m <sup>2</sup> ) del tejido								
Camisa 182,2 g/m <sup>2</sup> azul	5	3	5,7	4,6	6,3	5,9	6,9	6,5
Camisa 217,2 g/m <sup>2</sup> blanca	9,3	0,9	10,7	6,4	12	10,9	13,3	12,5
Camisa 241,7 g/m <sup>2</sup>	5,6	2,4	6,9	5,3	8	7,5	9,1	8,5
241,7 g/m <sup>2</sup> material de la camisa >161,1 g/m <sup>2</sup>	4,8	-17,2	6,4	-2,9	7,9	6,2	9,4	8,2
Camisa o pantalón de 280,2 g/m <sup>2</sup> negro	6,9	4,3	7,4	6,1	7,9	7,5	8,3	8,1
Camisa o pantalón, blanco, satinado 290,7 g/m <sup>2</sup>	11,9	5,7	14,5	11,6	17	16	19,5	18,2
Pantalón o camisa 416,9 g/m <sup>2</sup>	12,2	4,3	15	11,3	17,6	16,7	20,2	18,9
Pantalón 448,4 g/m <sup>2</sup>	16,1	11,9	17,6	15,5	19	18,3	20,3	19,6
Pantalón 465,9 g/m <sup>2</sup>	16,8	12,4	18	15,9	19,1	18,6	20,2	19,6

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

Resultados determinados por ASTM F 1958.

L95 % el nivel de energía incidente mas bajo que da un nivel de confianza del 95 % para un número determinado de datos.

Valores negativos de energía incidente indican la incertidumbre debida a la disponibilidad de los datos entre el 1 % y el 10 % de probabilidad de ignición. La energía incidente nunca puede ser menor que cero.

### 6.3.1. Guía general y recomendaciones de uso

Las siguientes recomendaciones fueron desarrolladas por Richard L. Doughty de para reducir las quemaduras, resultantes por exposición al arco. Estas recomendaciones se basan en el conocimiento adquirido en la realización de pruebas de arco y del análisis de la ropa expuesta al flameo y su relación con las quemaduras asociadas.

- La selección de la ropa de protección, debe estar basada en el peor de los casos posibles de exposición al arco durante la realización de una tarea.
- Debido a que las quemaduras más graves, muchas de las veces están relacionadas con el nivel de ignición de algunos tejidos, se debe evitar el uso de tejidos inflamables en las capas externas de la ropa protectora.
- Las capas externas de tejidos resistentes al flameo, no deben tener aperturas que expongan las capas internas de tejidos sin tratamiento.

- Se debe evitar el uso de ropa ajustada . La ropa suelta ofrece un aislamiento térmico extra, debido a los espacios de aire.
- Cuando el tejido externo resistente al flameo sea incapaz de resistir rupturas, la segunda capa de tejido debe ser también resistente al flameo. La ruptura está definida como la creación de huecos o rupturas en el tejido expuesto, de tal forma que la energía incidente no se bloquea efectivamente, transpasando la superficie debajo del tejido.
- Se debe evitar el uso de fibras sintéticas, que se derritan debajo de la ropa resistente al flameo, cuando estas fibras se derriten se pueden adherir a la piel, aumentando la transferencia de calor y por tanto la gravedad de las lesiones.

Para un tipo específico de tejido, el rendimiento de la protección, generalmente aumenta con el peso y el grosor del tejido, cuando los niveles de ignición son menores que los requeridos para causar ignición o descomposición del tejido. La ropa de múltiples capas es generalmente mas efectiva que la de una sola capa. Un sistema efectivo de protección está formado por una o más capas externas resistentes al flameo sin aperturas, además, de fibras en las capas internas que no se derritan, del suficiente grosor y peso, para minimizar las quemaduras en la piel.

### 6.3.2. Rendimiento de la ropa protectora resistente al flameo

El comité de ASTM F18.65 ha desarrollado otra prueba, por medio ASTM F1959, para cuantificar el rendimiento térmico de los materiales resistentes al flameo. Este método expone la ropa resistente al flameo al calor de arcos eléctricos y mide el valor de rendimiento térmico por exposición al arco (ATPV). El rendimiento del tejido se determina, por la cantidad de energía térmica transmitida por el tejido y los efectos de la exposición al arco observados en el tejido. El procedimiento de prueba usa tres paneles instrumentados con calorímetros, los cuales están cubiertos con el tejido de prueba. ATPV se define en la norma ASTM F1959, como la energía incidente mínima, que puede generar quemaduras de segundo grado. Es decir, si la energía incidente transmitida por la ropa protectora es menor a  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ , no se esperan quemaduras de segundo grado en la piel expuesta.

La norma ASTM F1959, hace referencia a  $E_{BT}$  que se define como el promedio de las cinco energías incidentes mas altas, que no causan la ruptura de tejidos resistentes al flameo y que no exceden el criterio de quemaduras de segundo grado.  $E_{BT}$  se reporta, cuando el ATPV no puede ser medido debido a la ruptura del tejido resistente al flameo. Las rupturas se definen como cualquier apertura de la ropa protectora resistente al flameo con un área superior a  $0,5$

Tabla 6.5: Guía de la ropa protectora para flameos por arco

Clase de la ropa		Sistema de ropa resistente al flameo		Quemadura 2° grado
Energía incidente cal/cm <sup>2</sup>	Clase	Descripción número de capas	Peso (g/m <sup>2</sup> )	ATPV (cal/cm <sup>2</sup> )
0 - 2	0	Algodón sin tratamiento	160 - 245	N/A
2 - 5	1	Camisa y pantalón FR	160 - 280	5 - 7
5 - 8	2A	Ropa de algodón en capas internas y en las externas camisa y pantalón FR	315 - 420	8 - 18
5 - 16	2B	Ropa FR en capas internas y en las externas camisa y pantalón FR	350 - 490	16 - 22
8 - 25	3	Ropa FR en capas internas y en las externas camisa y pantalón FR mas cobertura	560 - 700	25 - 50
25 - 40	4	Ropa de algodón en capas interiores, pantalón y camisa FR mas traje de protección contra flameo de dos capas	840 - 1050	40 - >60

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

pulg<sup>2</sup>(3,2 cm<sup>2</sup>) o una rasgadura en el tejido de longitud superior a 1 pulg (2,54 cm). La tabla 6.5 resume los rangos de ATPV o E<sub>BT</sub> para un rango de ropa resistente al flameo disponible, donde se relaciona el número de capas de la ropa resistente al flameo y arbitrariamente designa al algodón sin tratamiento como clase 0.

El uso de ropa resistente al flameo no evita la posibilidad de una lesión por quemadura. Como se muestra en la tabla 6.5 el número de capas de la ropa resistente al flameo aumenta en la medida que aumenta el riesgo por energía incidente. Por ejemplo si el análisis de riesgo ante flameo por arco resulta en una energía incidente de 8 cal/cm<sup>2</sup>, el sistema de ropa protectora indicada es de clase 2A. Basados en los resultados se espera que una quemadura de segundo grado ocurra en el rango de 8 - 18 cal/cm<sup>2</sup> para el sistema de protección de ropa resistente al flameo clase 2A.

### 6.3.3. Sistemas de ropa con para-amidas y meta-aramidas

Las tablas 6.6 y 6.7 muestran los resultados de pruebas en tejidos con para y meta-amidas basados en exposiciones al arco simuladas en los laboratorios. Las exposiciones reales al arco pueden ser mas o menos severas que estas simulaciones en el laboratorio. Los parámetros de la realización de estas pruebas fueron: corriente de arco 8 kA, tensión de circuito abierto 3000 V, separación entre electrodos 12" (30 cm). El factor de atenuación del calor es el porcentaje de la energía incidente bloqueada por el sistema o tejido. Los tejidos de meta-aramidas contienen 5% de para-amidas y 2% de fibras antiestáticas a menos que lo diga en la tabla.

Tabla 6.6: Resultados típicos de pruebas de arco en sistemas de tejidos de meta-aramida de una sola capa

Color del tejido Peso g/m <sup>2</sup>	Rendimiento por exposición al arco térmico			Factor de atenuación del calor		
	ATPV cal/cm <sup>2</sup>	CL95 % Medio	Indiv. C95 %	HAF %	CL95 % medio	CL95 % indiv
168,1 azul	5	4,6 - 5,3	3,6 - 6,3	60,2	57,2 - 62,8	50,5 - 69,9
168,1 blanca	4,6	4,4 - 4,9	3,7 - 5,6	67,9	66 - 69,9	60,5 - 75,4
168,1 negro	5,3	5 - 5,6	4,2 - 6,4	59,2	56,8 - 61,5	50,3 - 68,1
224,2 azul real	6,4	5,9 - 6,9	4,9 - 7,8	67,6	65,4 - 69,7	61,7 - 73,9
248,7 azul real	7,2	6,8 - 7,7	5,8 - 8,6	68,9	66,9 - 70,8	62,4 - 75,3
318,1	9,7	9,1 - 10,2	7,6 - 11,8	75,1	74,4 - 75,8	72,7 - 77,5
408,9	20,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

Tabla 6.7: Resultados típicos de pruebas de arco en sistemas de tejidos de meta-aramida de capas múltiples

Sistemas de tejidos multicapa			Energía de ruptura
Peso del tejido y descripción g/m <sup>2</sup>	Capas	Peso g/m <sup>2</sup>	E <sub>BT</sub> cal/cm <sup>2</sup>
Camisa interior de algodón 147 Meta-aramida, azul 165	2	312	9
Camisa de algodón 147 Meta-aramida azul 217	2	364	11
Camisa de algodón 147 meta-aramida 165 meta-aramida 217	3	522	35,8
Camisa de algodón 147 meta-aramida 165 meta-aramida doble capa 277	4	876	>50

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

Tabla 6.8: Resultados de las pruebas, de ropa impermeable que cumple con ASTM F1891-99a

Material	ATPV cal/cm <sup>2</sup>	E <sub>BTAS</sub> cal/cm <sup>2</sup>	Componentes
Meta-aramida, uretano/meta-aramida, trilamitao 350 g/m <sup>2</sup> amarillo	13	30	No impermeable
Meta-aramida, uretano/meta-aramida trilamitate 160 g/m <sup>2</sup> Forro interno de meta-aramida	15.7	33	Liviano, adecuado para protección de flameo
PVC / meta-aramida / para-amida 260 g/m <sup>2</sup>	Amarillo F. 7, Amarillo 12, Naranja 16	Naranja F. 40 amarillo 36 naranja 33	No se derrite
Neopreno / meta-aramida 350 g/m <sup>2</sup> amarillo	9	40	No se derrite
PVC / meta-aramida/para-aramida 300 g/m	Naranja F. 8, amarillo 17	Naranja F. 31 amarillo 38	No se derrite
PVC / meta-aramida 350 g/m <sup>2</sup>	Naranja F. 5 amarillo 7 naranja 13	30	Impermeabilidad
Nylon/neopreno resistente al flameo 350 g/m <sup>2</sup> amarillo	12	Nivel de ignición 29	Derrite a 29,6 cal/cm <sup>2</sup>
Poliuretano/nylon forrado con algodón FR 160 g/m <sup>2</sup>	11	22	Se derrite

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

#### 6.3.4. Rendimiento de la ropa impermeable

La ropa impermeable resistente al flameo, en el pasado ha sido hecha de materiales que se derriten como el nylon, poliéster, neopreno o uretano. Esta ropa no funciona bien en flameos por arco, debido a que estos materiales se derriten con facilidad, a niveles de energía bajos. La mayoría de los materiales nuevos usados en la ropa impermeable de la actualidad, combina sustratos de tejidos que no se derriten (aramidas los mas comunes) con trajes y laminaciones impermeables resistentes al flameo. En las tablas 6.8 y 6.9 se muestran los resultados de pruebas de resistencia a la llama, hechas sobre algunos tipos de ropa impermeable.

Tabla 6.9: Resultados de pruebas en ropa impermeable con una capa de tejido resistente al flameo

Material	Resistencia cal/cm <sup>2</sup>	E <sub>BTAS</sub> cal/cm <sup>2</sup> sin capa	Resistencia con capa FR
PVC, meta-aramida, para-aramida 260 g/m <sup>2</sup> amarillo	12	36	40 Capa 160 g/m <sup>2</sup> meta-aramida
PVC, meta-aramida, para-aramida 300 g/m <sup>2</sup> naranja F	8	31	29,6 Capa 160 g/m <sup>2</sup> meta-aramida
PVC, meta-aramida, para-aramida 300 g/m <sup>2</sup> naranja F	16	40	34 capa 200 g/m <sup>2</sup> camisa de algodón

Fuente: Electric arc hazard assesment and personnel protection, IEEE, Richard L. Doughty

# Capítulo 7

## Desarrollo de la herramienta software

### 7.1. Introducción

En este capítulo se presenta la herramienta software y la metodología propuesta para la realización de los cálculos necesarios, para estimar el nivel de riesgo ante flameo por arco. El objetivo es estimar de manera confiable, la energía incidente a la que un trabajador puede estar expuesto ante un evento de flameo por arco, y mediante la selección adecuada de la ropa protectora y el cálculo de la distancia límite de protección contra flameo, lograr una disminución de las consecuencias de este fenómeno. También se describe detalladamente el programa y se muestra la interfaz gráfica.

### 7.2. Metodología a seguir en el análisis de riesgo ante flameo por arco según la norma NFPA 70E

Al emplear el método de la norma [NFPA 70E, 2004] para llevar a cabo un análisis detallado de riesgo ante flameo por arco, se requiere de los siguientes pasos:

PASO 1: determinar el límite de protección contra flameo (quemadura curable).

PASO 2: determinar la distancia mínima de aproximación al punto potencial de arco, desde el punto donde se va a desarrollar el trabajo. Medir la distancia mas cercana a la cara, o si la realización de la tarea cae dentro del límite de protección contra flameo, entonces se requiere de un análisis de riesgo para determinar la ropa resistente al flameo adecuada y los elementos de protección personal.

PASO 3: determinar la corriente de falla en el punto de trabajo. Se pueden realizar dos cálculos, uno para la máxima corriente de falla trifásica de contacto y otra con el valor mas bajo de corriente de falla a la cual el arco es autosostenible. Para sistemas de 480 V, la industria acepta como nivel mínimo de corriente para arco autosostenible, el 38 % de máxima corriente de falla trifásica de contacto.

PASO 4: determinar los tiempos totales de despeje, (aguas arriba en perspectiva de la ubicación del arco) tanto para la máxima corriente de falla, como para el nivel al cual el arco es autosostenible.

PASO 5: seleccionar si la energía incidente, va a ser determinada para un arco al aire libre o en encerramientos. Usar la fórmula adecuada para calcular la energía incidente. La energía incidente para arcos al aire libre, la puede calcular mediante la ecuación (4.14) y para aplicaciones en encerramientos, la puede calcular mediante la ecuación (4.15).

PASO 6: emplear los datos y las fórmulas anteriores para calcular la energía incidente ante los niveles máximos y mínimos de falla.

PASO 7: si la energía incidente calculada es menor a  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ , no se requiere ropa protectora de flameo, para la protección contra la energía incidente. Pero se pueden requerir elementos de protección personal, para la protección de los otros riesgos relacionados con el flameo por arco, como la onda de presión generada por la explosión.

PASO 8: si el nivel de la energía incidente calculada es  $1,2 \text{ cal/cm}^2$  o mayor se deben consultar las tablas 130.7(C)(10) de [NFPA 70E, 2004] y verificar la ropa protectora resistente al flameo y los elementos de protección personal.

PASO 9: asegurarse que el valor de rendimiento por exposición al arco térmico ATPV, o el valor de ruptura del sistema  $E_{BT}$ , de ropa protectora, exceda la energía incidente a la cual el trabajador va a estar expuesto.

### 7.3. Metodología a seguir en el análisis de riesgo ante flameo por arco según la norma IEEE 1584

La norma IEEE 1584 2004 provee un método para llevar a cabo el análisis de riesgo ante flameo por arco. Este método emplea ecuaciones desarrolladas a partir de análisis estadístico de datos, resultantes de pruebas de flameo por arco, llevadas a cabo en laboratorios.

Un análisis de riesgo ante flameo por arco detallado, empleando el método allí propuesto debe seguir los siguientes pasos:

PASO 1: recolectar la información del sistema de potencia, la instalación y los datos de los equipos. Los datos requeridos en este estudio son similares a los de estudios de coordinación de protecciones y cortocircuito, sin embargo también se requiere información del sistema de distribución de baja tensión, equipos de control con sus alimentadores y derivaciones largas de circuitos.

PASO 2: revisar del diagrama unifilar para cada locación y determinar los modos de operación del sistema de potencia. Si no hay uno, se debe desarrollar, esto facilita la visualización de los diferentes modos de operación tales como:

- Operación normal.
- Anillos cerrados.
- Transformadores en paralelo.
- Alimentadores duales.

PASO 3: hacer un análisis de las corrientes máximas y mínimas disponibles de cortocircuito para cada uno de los diferentes modos de operación que apliquen. Determinar el valor eficaz de la corriente de cortocircuito de contacto trifásico para el primer ciclo. Equipos por debajo de los 240 V no necesitan ser considerados, a menos que sean alimentados por un transformador de 125 kVA o mayor de baja impedancia.

PASO 4: determinar las corrientes de falla de arco. La corriente de falla de arco, para cada lugar donde exista la posibilidad de flameo por arco y la porción de esa corriente, que hará que el dispositivo de protección opere.

PASO 5: encontrar la duración del arco, de las curvas de tiempo inverso de los dispositivos de protección. El tiempo total de despeje, determinará el factor de tiempo en las ecuaciones de la energía. Si la potencia del arco permanece constante, tiempos mas largos producirán mas energía, basados en la relación proporcional entre la energía y el producto de la potencia y el tiempo. Si un dispositivo de protección tiene tanto un disparador integral o un elemento fusible, el tiempo de despeje deberá incluir todas las variables y tolerancias, entonces el tiempo de despeje, será igual al tiempo de exposición al arco. Si dos dispositivos de operación operan en conjunto (como un relé de sobrecorriente que dispara un interruptor automático), entonces a la combinación de los tiempos de operación o de despeje, se debe sumar las tolerancias de operación. Se debe tener en cuenta la recomendación hecha por [IEEE 1584, 2002], si el tiempo de despeje de un arco es mayor a dos segundos, considere el tiempo que una persona pueda permanecer en la zona del flameo por arco. Si es probable que la persona expuesta al flameo por arco, se aleje rápidamente, 2 segundos es un tiempo razonable. Una persona que se encuentre en un sitio de difícil acceso, necesitará seguramente mas de 2 segundos para alejarse.

PASO 6: llevar un registro de las tensiones del sistema y las clases de los equipos para cada barra. Por ejemplo, se debe llevar un registro de las clases de los equipos en las celdas o centros de control de motores.

PASO 7: determinar las distancias de trabajo. Los límites de protección contra flameo por arco, se basan en la exposición a los niveles de energía incidente en la área del pecho y cara de la persona, a la distancia de trabajo. La gravedad de una quemadura depende del porcentaje de la piel de la persona que haya sido quemada.

PASO 8: determinar la energía incidente para cada sitio de trabajo en el estudio. La mejor forma es empleando la herramienta software desarrollada.

PASO 9: determinar los límites de protección contra flameo, para cada sitio de trabajo dentro del estudio. La ecuaciones de energía incidente pueden ser resueltas para la distancia desde la fuente del arco, a la cual una quemadura de segundo grado puede ocurrir. La energía incidente para límite de protección contra flameo se debe ajustar, al mínimo de la energía a la cual una quemadura de segundo grado puede ocurrir.

## 7.4. Esquema del proceso

La figura 7.1 muestra el esquema seguido por la herramienta software creada, para la realización de los cálculos necesarios en un análisis de riesgo ante flameo por arco, partiendo de la estimación de la energía incidente y llegando a la selección de la ropa protectora.

Se implementó la herramienta en Matlab v2008a, para la realización de los cálculos, además se desarrolló una interfaz gráfica, la cual le facilita a los usuarios la interacción con el programa.

El programa realiza el cálculo de los parámetros necesarios para la estimación del riesgo, ante un evento de flameo por arco por los métodos propuestos en las siguientes normas:

(a) IEEE 1584 2002.

(b) NFPA 70E 2004

### 7.4.1. Descripción del algoritmo empleado para realizar cálculos por [IEEE 1584, 2002]

Inicialmente, se debe revisar si los elementos de protección de la instalación donde se va a realizar el estudio, se ajustan a los datos por [IEEE 1584, 2002], la norma tiene las ecuaciones necesarias para estimar la energía incidente y los límites de protección contra flameo, en interruptores automáticos y fusibles de determinadas características técnicas, sin la necesidad de recurrir a las curvas de tiempo inverso de los mismos. Los dispositivos de protección se enumeran a continuación:

#### I. Interruptores automáticos en caja moldeada de tensiones de 208 V - 690 V

1. Interruptor automático en caja moldeada, disparador térmico-magnético o magnético de 100-400A.
2. Interruptor automático en caja moldeada, disparador térmico-magnético o magnético de 600-1200A.
3. Interruptor automático en caja moldeada, disparador electrónico, con característica de tiempo largo e instantáneo de 600-1200A.
4. Interruptor automático en caja moldeada o aislada, disparador electrónico con característica de tiempo largo e instantáneo 1600-6000A.

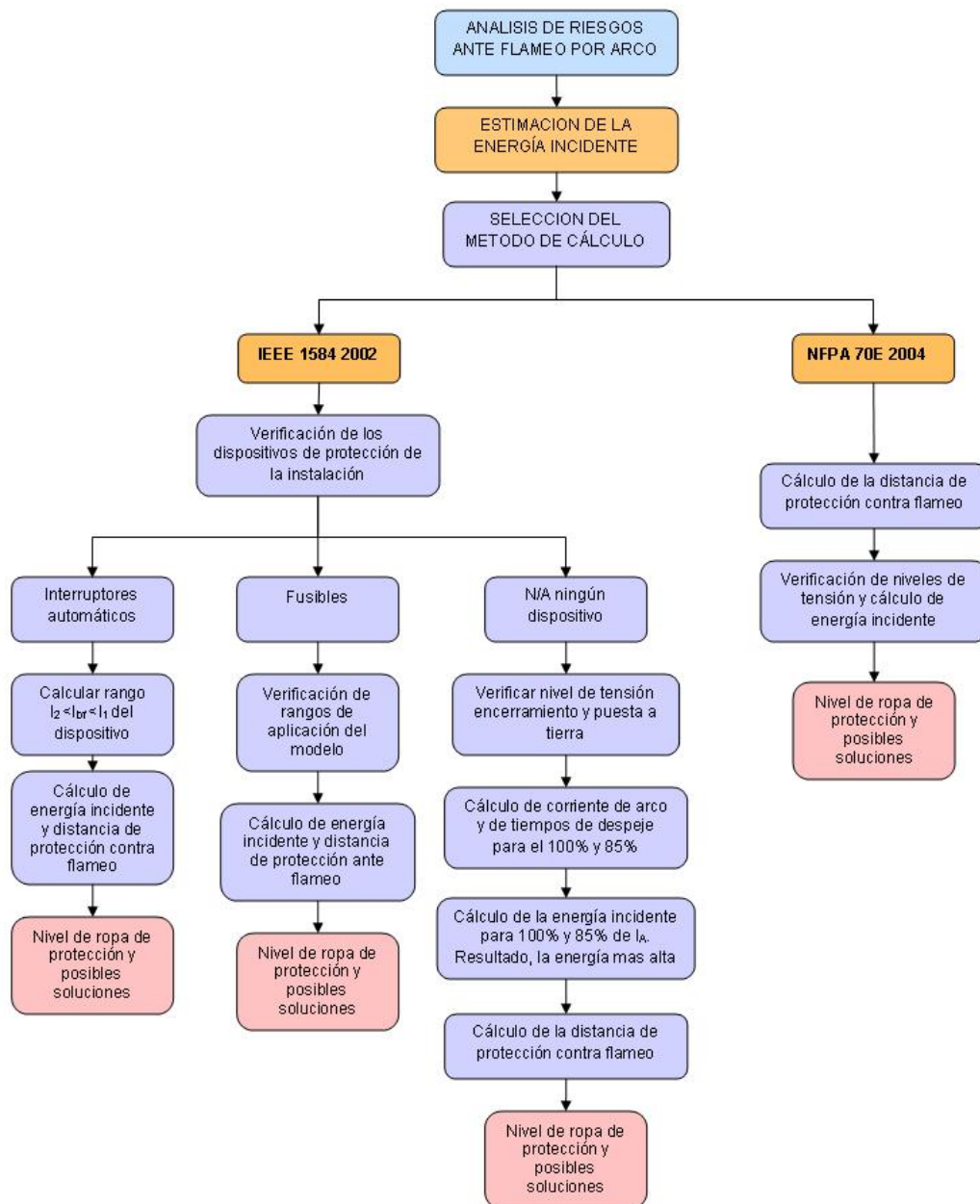


Figura 7.1: Esquema del programa de cálculo de la energía incidente

5. Interruptor automático de potencia, de baja tensión, disparador electrónico con característica de tiempo largo e instantáneo 800-6300 A.
6. Interruptor automático de potencia, de baja tensión, disparador electrónico con característica de tiempo largo y corto 800-6300 A.

Para realizar los cálculos, el programa pide los siguientes datos de entrada:

- $I_{bf}$ : corriente de falla de contacto, en el barraje donde se van a realizar los cálculos.
- $I_t$ : corriente de disparo instantáneo del interruptor.
- $I_{máx}$  : corriente máxima del interruptor automático.
- $V$ : nivel de tensión.

Con la corriente de disparo instantánea, y la corriente máxima de interrupción del interruptor automático, el programa calcula el rango de corrientes de falla de contacto  $I_1 < I_{bf} < I_2$ , para el cual el modelo es aplicable. Ver sección 4.2.1.3.

Con la corriente de falla de contacto, el programa hace los cálculos de energía incidente y límite de protección contra flameo.

Con el nivel de energía incidente, el programa encuentra el nivel de riesgo, el nivel requerido de la ropa de protección, la clase de los guantes requeridos.

Con el nivel de tensión el programa calcula el límite de aproximación segura, el límite de aproximación restringida y el límite de aproximación prohibida.

## II. Fusibles clase L y RK

Las fórmulas que modelan estos fusibles, fueron desarrolladas a partir de pruebas realizadas a una tensión de 600 V y una distancia de 45,5 cm, la cual es la distancia típica de realización de trabajos a este nivel de tensión según [IEEE 1584, 2002].

1. Fusibles clase L 1601 A - 2000 A, corrientes de falla de contacto de 22,6 kA - 106 kA.
2. Fusibles clase L 1201 A - 1600 A, corrientes de falla de contacto de 15,7 kA - 106 kA.
3. Fusibles clase L 801 A - 1200 A, corrientes de falla de contacto de 15,7 kA - 106 kA.
4. Fusibles clase L 601 A - 800 A, corrientes de falla de contacto de 15,7 kA - 106 kA.

5. Fusibles clase RK1 401 A - 600 A, corrientes de falla de contacto de 8,5 kA - 106 kA.
6. Fusibles clase RK1 201 A - 400 A, corrientes de falla de contacto de 3,16 kA - 106 kA.
7. Fusibles clase RK1 101 A - 200 A, corrientes de falla de contacto de 1,16 kA - 106 kA.
8. Fusibles clase RK1 hasta 100 A, corrientes de falla de contacto de 0,65 kA - 106 kA.

El programa pide los siguientes datos de entrada para realizar los cálculos:

- $I_{bf}$ : Corriente de falla de contacto, en el barraje donde se van a realizar los cálculos.

Con la corriente de falla, el programa calcula la energía incidente a 4,5 cm del punto posible de arco, el nivel de riesgo, el nivel requerido de la ropa de protección a esta distancia, la clase requerida para los guantes de protección.

### III. Si el dispositivo de protección no aplica a ninguno de los anteriores

En caso de que el dispositivo de protección instalado en el sitio donde se va a llevar a cabo el estudio, no se ajuste a las características de los dispositivos enumerados anteriormente, el programa, para realizar los cálculos pide los siguientes datos de entrada:

- $I_{bf}$ : corriente de falla de contacto, en el barraje donde se van a realizar los cálculos.
- $V$ : nivel de tensión.

El programa realiza una serie de cálculos dependiendo del nivel de tensión, de la siguiente manera:

#### (a) Tensiones menores o iguales a 15 kV

Si el nivel de tensión es menor o igual a 15 kV, el programa pide además los siguientes datos de entrada:

- $D$ : distancia al punto posible de arco
- Especificar si el dispositivo está ubicado dentro de un encerramiento como una celda o pánel o al aire libre.

Con estos datos de entrada el programa realiza los cálculos de corriente de arco. El usuario debe referirse a la curva de tiempo inverso del dispositivo de protección, que tenga en el sitio donde se va a realizar el análisis, para hallar los tiempos de despeje al 100 % y el 85 % de la corriente de arco, los cuales serán los datos de entrada en la siguiente etapa de cálculo del programa:

- $t_1$  : tiempo de despeje al 100 % de la corriente de arco calculada por el programa.
- $t_2$  : tiempo de despeje al 85 % de la corriente de arco calculada por el programa.
- Especificar si el sistema de potencia tiene de puesta a tierra o no.
- $x$  : exponente de distancia, de la tabla 4 de [IEEE 1584, 2002].
- $D$ : distancia al punto posible de arco.

Con estos datos de entrada, el programa calcula la energía incidente a la distancia de trabajo. Con el nivel de energía incidente, el programa encuentra el nivel de riesgo, el nivel requerido de la ropa de protección y el límite de protección contra flameo.

Con el nivel de tensión el programa calcula: el límite de aproximación segura, el límite de aproximación restringida y el límite de aproximación prohibida y la clase requerida de los guantes de protección.

#### (a) Tensiones mayores a 15 kV

Para niveles de tensión mayores a 15 kV, el programa pedirá los siguientes datos de entrada:

- $I_{bf}$ : corriente de falla de contacto, en el barraje donde se van a realizar los cálculos.
- $t$ : tiempo de despeje de la falla, el cual se obtiene de la curva de tiempo inverso del dispositivo de protección respectivo.
- $D$ : distancia al punto posible de arco.

Con estos datos de entrada el programa calcula, la energía incidente y con ella el nivel requerido de la ropa de protección y el nivel de riesgo.

También realiza el cálculo del límite de protección contra flameo, el límite de aproximación segura, el límite de aproximación restringida, el límite de aproximación prohibida y la clase requerida de los guantes de protección.

### 7.4.2. Descripción del algoritmo empleado para realizar cálculos por [NFPA 70E, 2004]

La norma [NFPA 70E, 2004], incluye el método de la norma [IEEE 1584, 2002], por lo tanto la parte incluida en el software, es un método de cálculo alternativo que no está incluido en el anterior.

Como datos de entrada, el programa pide los siguientes valores:

- **V**: nivel de tensión.
- **I<sub>bf</sub>**: corriente de falla de contacto, en el barraje donde se van a realizar los cálculos.
- **t**: tiempo de despeje de la falla, el cual se obtiene de la curva de tiempo inverso del dispositivo de protección respectivo.
- **D**: distancia al punto posible de arco.

Dependiendo del nivel de tensión, el programa realiza los cálculos respectivos:

#### (a) Tensiones mayores a 600 V

El programa calcula, la energía incidente, la distancia mínima de protección contra flameo, el nivel de protección requerido de la ropa de protección y la clase requerida de los guantes de protección.

#### (b) Tensiones menores a 600 V

El programa requiere de los siguientes datos de entrada para la realización de los cálculos:

- Especificar si el dispositivo está ubicado dentro de un encerramiento como una celda o pánel o al aire libre.

El programa calcula, la energía incidente, la distancia mínima de protección contra flameo, el nivel de protección requerido de la ropa de protección, la clase requerida de los guantes de protección, los límites de protección y la categoría del riesgo.

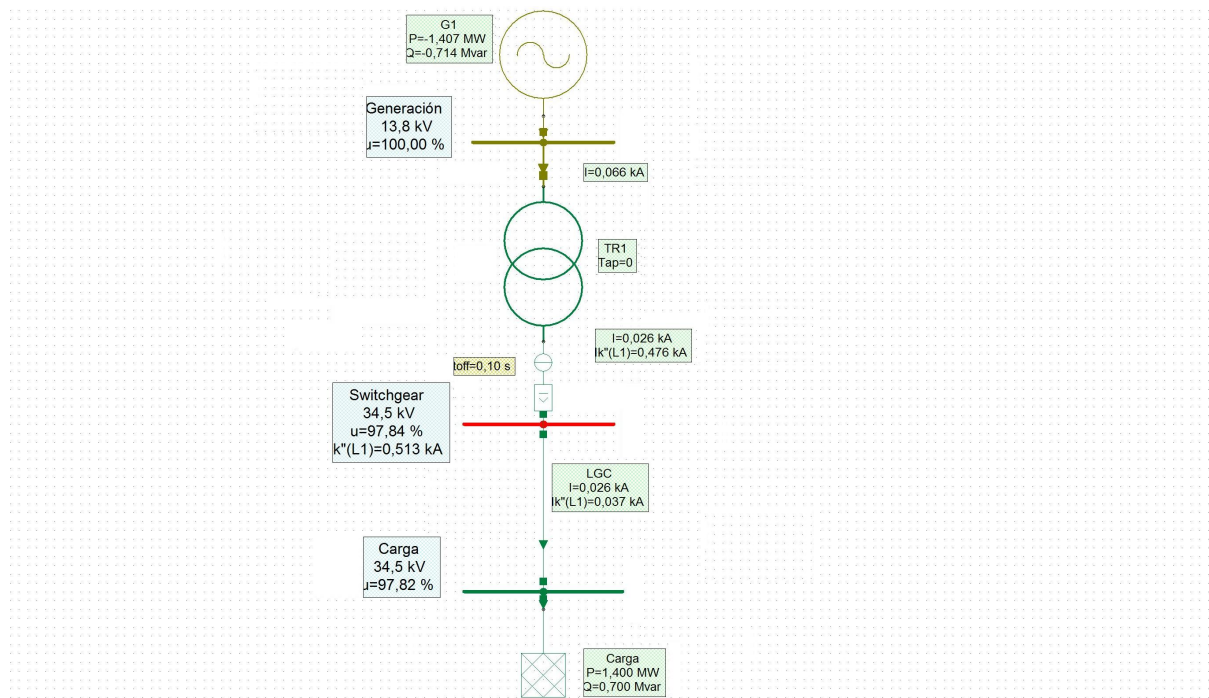


Figura 7.2: Esquema del sistema de potencia del ejemplo tipo

## 7.5. Ejemplo tipo

### 7.5.1. Estudio de cortocircuito

Se va a realizar un análisis de riesgo ante un evento de flameo por arco en el sistema de la figura 7.2. Para hacer posible la estimación del nivel de riesgo, se debe hacer previamente un análisis de cortocircuito, donde se calculen las corrientes máximas de falla trifásica y los tiempos de despeje de las mismas, por los dispositivos de protección. Para la realización del estudio de cortocircuito, se empleó el programa NEPLAN versión demo. La barra puesta en falla, se llamó Switchgear y está ubicada en el lado de alta (34,5 kV) del transformador T1, donde va ubicada la celda de protección del generador G1. En la figura 7.2 se ven las corrientes, resultado del análisis de cortocircuito y de flujo de potencia del sistema.

### 7.5.2. Análisis de riesgo ante flameo por arco a corriente de falla plena

Para la solución del ejemplo por el método de la norma [IEEE 1584, 2002], al 100 % de la corriente de falla. La corriente de falla fué tomada del análisis de cortocircuito en la figura 7.2. Se requieren los siguientes datos de entrada:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,1 s (ver figura 7.2).
- $I_f$  : corriente de falla: 0,476 kA (ver figura 7.2).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el 100 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 7.3:

- Energía incidente: 5,6793 J/cm<sup>2</sup> (1,3562 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 838,76 mm.
- Categoría del riesgo: 0.
- Descripción de la ropa de protección: materiales como algodón sin tratamiento, lana, seda o mezcla de estos materiales con un peso del tejido mínimo de 152,58 g/m<sup>2</sup> (4,5 oz/yd<sup>2</sup>).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

### 7.5.3. Análisis de riesgo ante flameo por arco a corriente de falla reducida

El método empleado por la norma [IEEE 1584, 2002], exige que se hagan los cálculos de energía incidente con el 85 % de la corriente de falla. La corriente de falla fué tomada del análisis de cortocircuito en la figura 7.2, por lo tanto los datos de entrada serán los siguientes:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.

FLAMEO

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.1 s

Corriente de Falla: 0.476 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 5.6793 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 1.3562 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 838.7601 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP: 0

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 146kV	3.36	3.05	1.093	0.9398

Figura 7.3: Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla

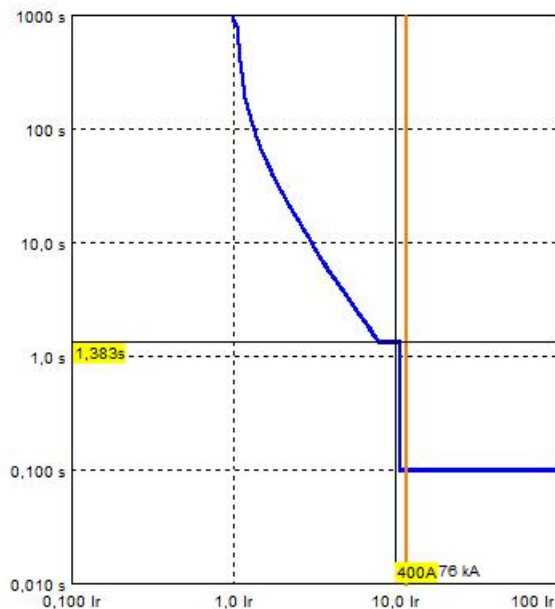


Figura 7.4: Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección DP1

- $t$ : tiempo de despeje de la corriente de arco: 1,383 s (ver figura 7.4).
- $I_f$ : corriente de falla: 0,400 kA (ver figura 7.2, se toma el 85 % de la corriente de falla).
- $D$ : distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el cálculo del tiempo de despeje del dispositivo de protección DP1, se recurre a la curva de tiempo inverso del mismo, figura 7.4 y se calcula el tiempo de despeje al 85 % de la corriente de falla.

Para el 85 % de la corriente de falla, resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 7.5:

- Energía incidente: 66,0042 J/cm<sup>2</sup> (15,7618 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 2859,4 mm.
- Categoría del riesgo: 3.
- Descripción de la ropa de protección: Ropa de algodón debajo de camisa, pantalón y cobertor resistentes al flameo.
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).

- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 2B (ver tabla 6.5, capítulo 6).

#### 7.5.4. Análisis de los resultados

Según la norma [IEEE 1584, 2002], después de realizar los cálculos a corriente de falla plena y reducida, se debe escoger de las dos situaciones, la mas desfavorable, es decir, la que presenta el nivel de riesgo de mayor. Al analizar los resultados se ve que la situación mas desfavorable ocurre al 85% de la corriente de falla, y se puede concluir que aunque la corriente de falla se haya disminuido al 85%, el hecho de que el tiempo de despeje aumente aproximadamente 20 veces, tiene mayor influencia en los resultados.

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 1.383 s

Corriente de Falla: 0.4 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 66.0042 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 15.7618 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 2859.403 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 3

Tipo Ropa: Ropa de algodón debajo de camisa, pantalón v cobertor

Clase de EPP: 2B

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	38.1 kV - 48kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	48.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.38	3.05	1.093	0.9398

Figura 7.5: Datos de entrada y resultados del análisis para el 85% de la corriente de falla

# Capítulo 8

## Implementación de un ejemplo de análisis de riesgo ante flameo por arco

### 8.1. Introducción

En este capítulo se realizará un ejemplo de un análisis de riesgo ante flameo por arco para un sistema de potencia, lo cual permitirá aplicar los conocimientos previamente adquiridos durante la realización de este proyecto, además de verificar la utilidad de la herramienta software. En últimas se espera conseguir es la reducción de los riesgos ante flameo por arco, mediante la estimación de los parámetros exigidos por la normas [IEEE 1584, 2002] y [NFPA 70E, 2004].

Para poder llevar a cabo el análisis de riesgos ante flameo por arco es necesario llevar a cabo previamente un estudio de cortocircuito, para conocer las corrientes de falla máximas y los tiempos de despeje de los dispositivos de protección.

### 8.2. Recolección de los datos del sistema de potencia y la instalación

#### 8.2.1. Datos de los generadores de 1750 kVA

Fabricante: Cummins.

Tensión nominal: 13800 V.

Frecuencia: 60 Hz.

Velocidad: 1200 rpm.

Corriente nominal 209 A.

Potencia: 1750 kVA.

Factor de potencia: 0,8.

Reactancia de eje directo  $X_d$ : 1 pu.

Reactancia de eje en cuadratura  $X_q$ : 0,68 pu.

Reactancia transitoria de eje directo  $X'_d$ : 0,31 pu.

Reactancia subtransitoria de eje directo  $X''_d$ : 0,27 pu.

### 8.2.2. Datos del generador de 5000 kVA

Fabricante: Waukesha.

Tensión nominal: 13800 V.

Frecuencia: 60 Hz.

Velocidad: 1200 rpm.

Corriente nominal: 209 A.

Potencia: 5000 kVA.

Factor de potencia: 0,8.

Reactancia de eje directo  $X_d$ : 1 pu.

Reactancia de eje en cuadratura  $X_q$ : 0,6 pu.

Reactancia transitoria de eje directo  $X'_d$ : 0,32 pu.

Reactancia subtransitoria de eje directo  $X''_d$ : 0,2 pu.

### 8.2.3. Datos de los transformadores elevadores de 2500 kVA

Fabricante: Siemens.

Capacidad nominal: 2500 kVA.

Tensión nominal lado de baja: 13800 V.

Tensión nominal lado de alta: 34500 V.

Corriente nominal de baja: 104 A.

Corriente nominal de alta: 41 A.

Conexión: YnD5.

#### 8.2.4. Datos del transformador elevador de 5000 kVA

Fabricante: Siemens.

Capacidad nominal: 5000 kVA.

Tensión nominal lado de baja: 13800 V.

Tensión nominal lado de alta: 34500 V.

Corriente nominal de baja: 209 A.

Corriente nominal de alta: 83 A.

Impedancia: 10 %.

Conexión: YnD5.

#### 8.2.5. Datos del transformador de servicios auxiliares

Fabricante: Siemens.

Capacidad nominal: 45 kVA.

Tensión nominal, lado de baja: 220 V.

Tensión nominal, lado de alta: 34500 V.

Corriente nominal, lado de baja: 118 A.

Corriente nominal, lado de alta: 1,3 A.

### 8.3. Diagrama unifilar

En la figura 8.1 se observa el diagrama unifilar del centro de generación.

### 8.4. Estudio de cortocircuito

#### 8.4.1. Cálculo de las corrientes de falla máximas y tiempos de despeje de los dispositivos de protección

El objetivo principal es calcular los niveles de cortocircuito trifásico en las barras principales de una planta de generación a gas. Con la información adquirida se modela el sistema eléctrico del centro de generación, mediante el programa de análisis de sistemas de potencia NEPLAN versión demo.



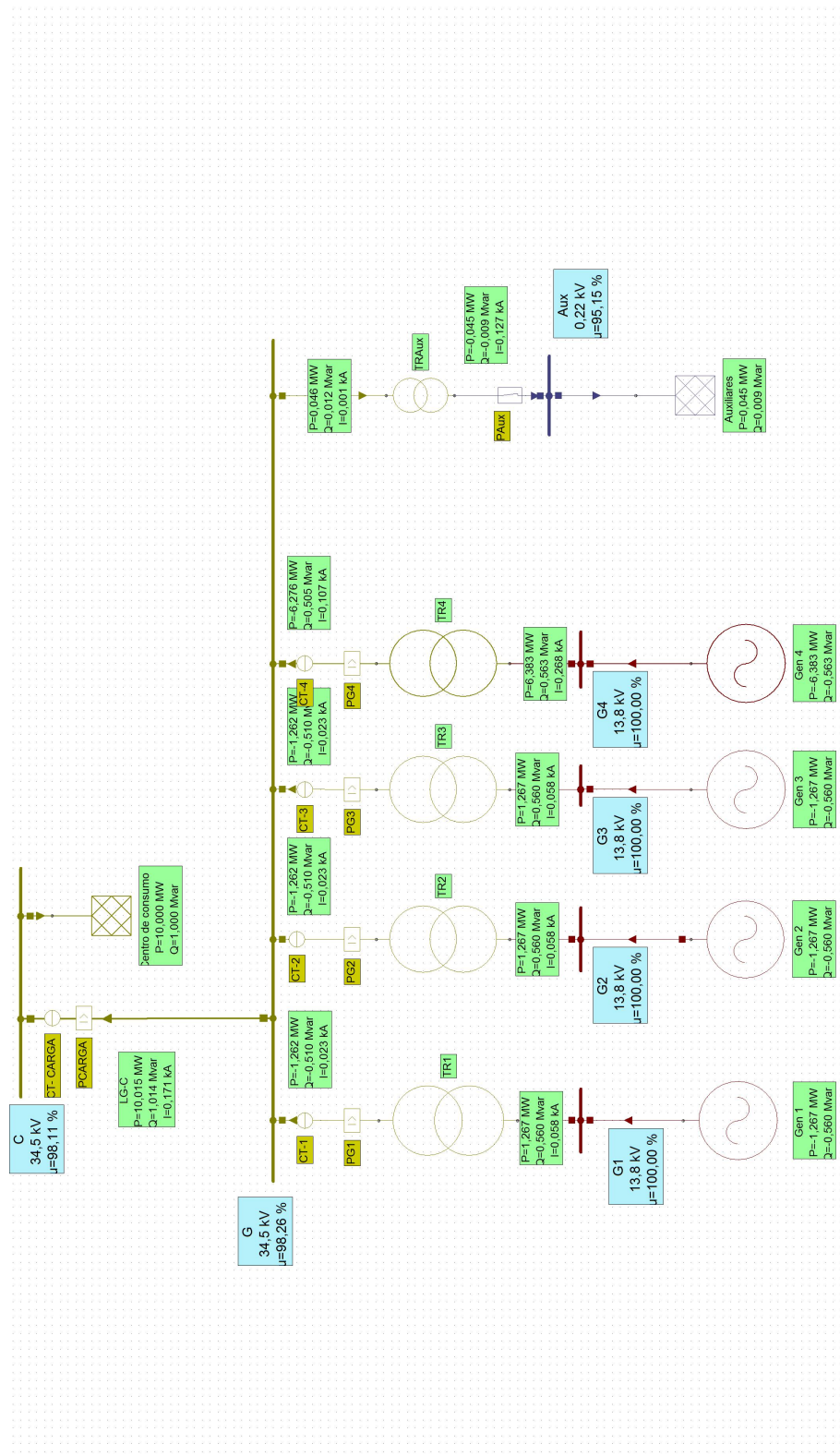


Figura 8.2: Centro de generación montado en NEPLAN

El montaje del sistema en NEPLAN versión demo se observa en la figura 8.2.

### Consideraciones

El análisis de cortocircuito para el centro de generación, se realizó con el programa de análisis de sistemas de potencia NEPLAN versión demo, el cual es de instalación libre.

El cálculo del cortocircuito se realizó mediante la norma IEC60909 2001.

El modelado de la red eléctrica se realizó en el programa NEPLAN, considerando el diseño respectivo y las especificaciones de los transformadores y generadores del centro de generación.

Para la correcta interpretación de los resultados, a continuación se presenta una descripción de las corrientes de cortocircuito que se incluyen en los diagramas unifilares.

- Corriente de cortocircuito momentánea simétrica ( $I_k''$ ). Es el valor efectivo de la componente simétrica de AC, de la corriente de cortocircuito generada en el primer medio ciclo de ocurrida la falla.

#### 8.4.1.1. Falla trifásica en los barrajes de los generadores

En la figura 8.3 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra G1

En la figura 8.4 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra G2

En la figura 8.5 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra G3

En la figura 8.6 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra G4

#### 8.4.1.2. Falla trifásica en el barraje principal de 34,5 kV

En la figura 8.7 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra G

#### 8.4.1.3. Falla trifásica en el barraje del centro de consumo

En la figura 8.8 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra C

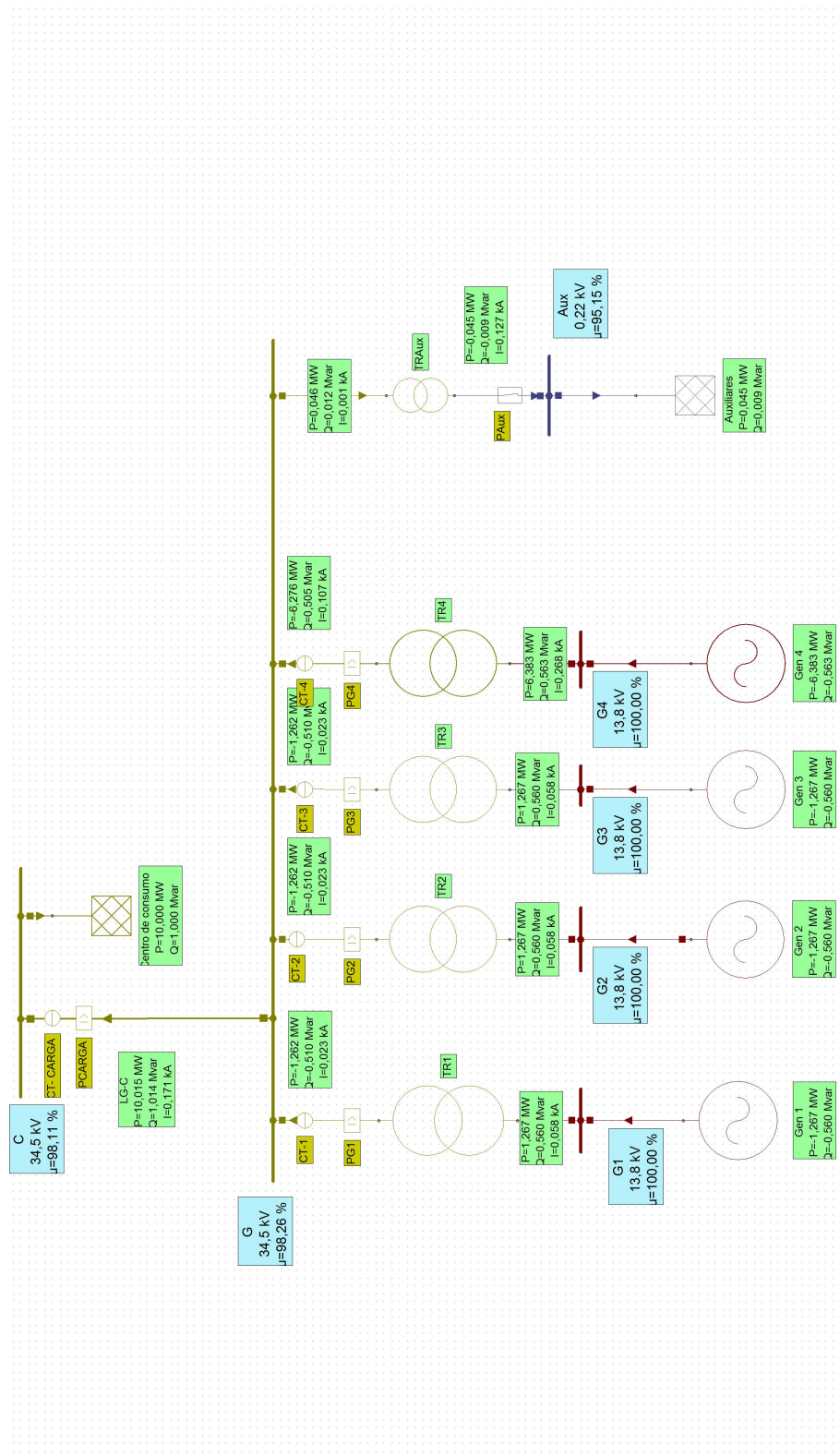


Figura 8.3: Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 1

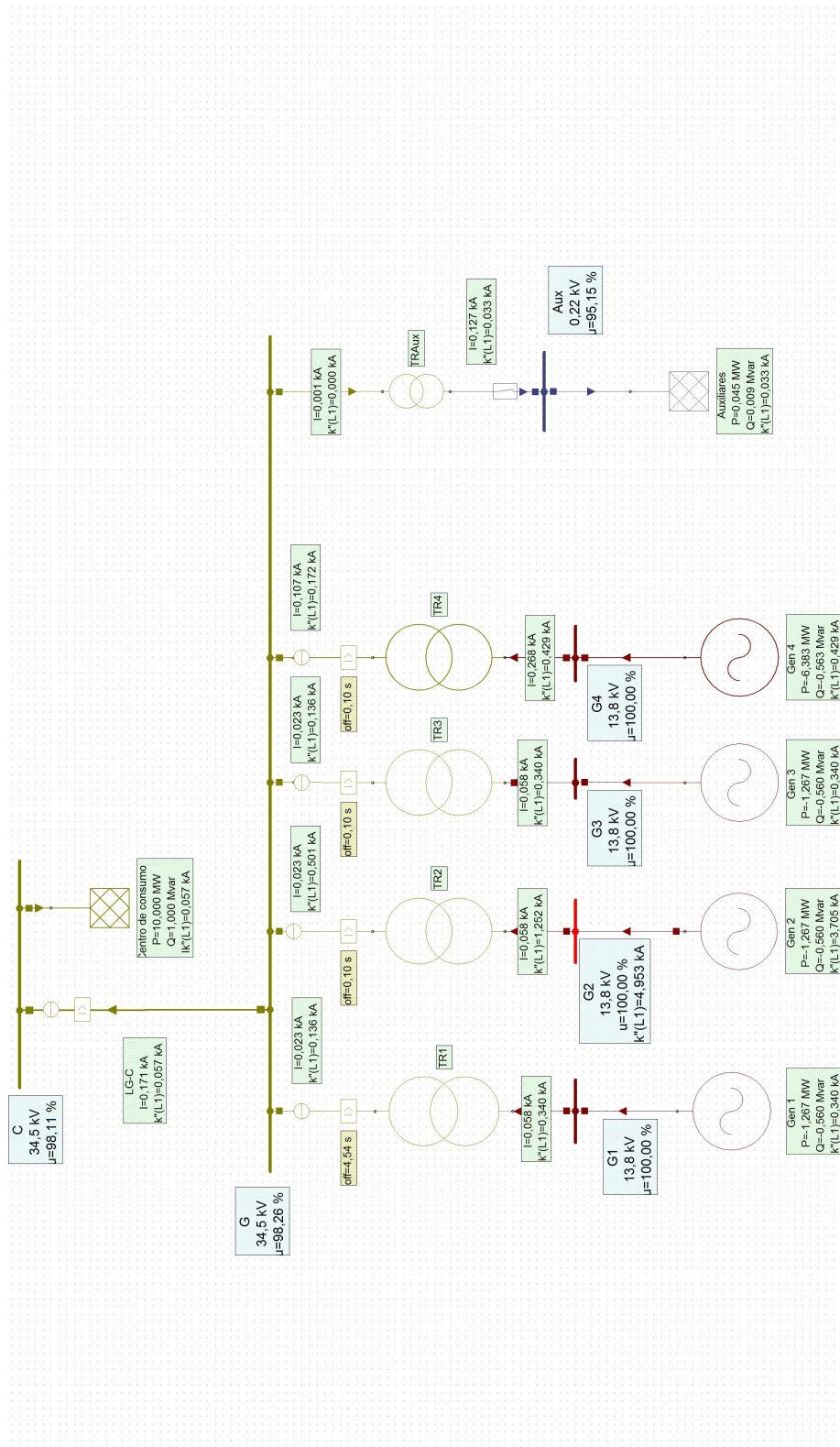


Figura 8.4: Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra del generador 2

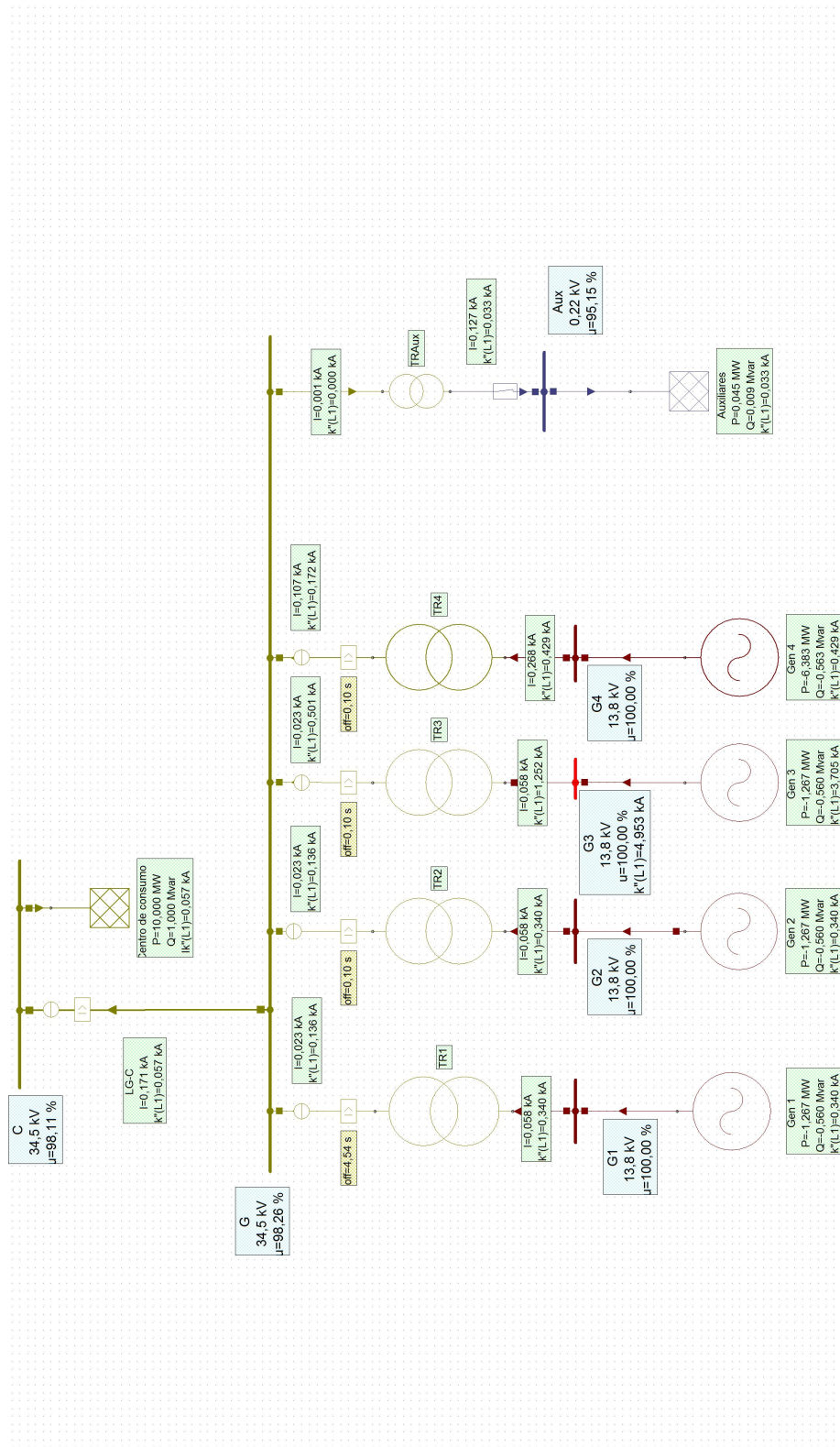


Figura 8.5: Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 3

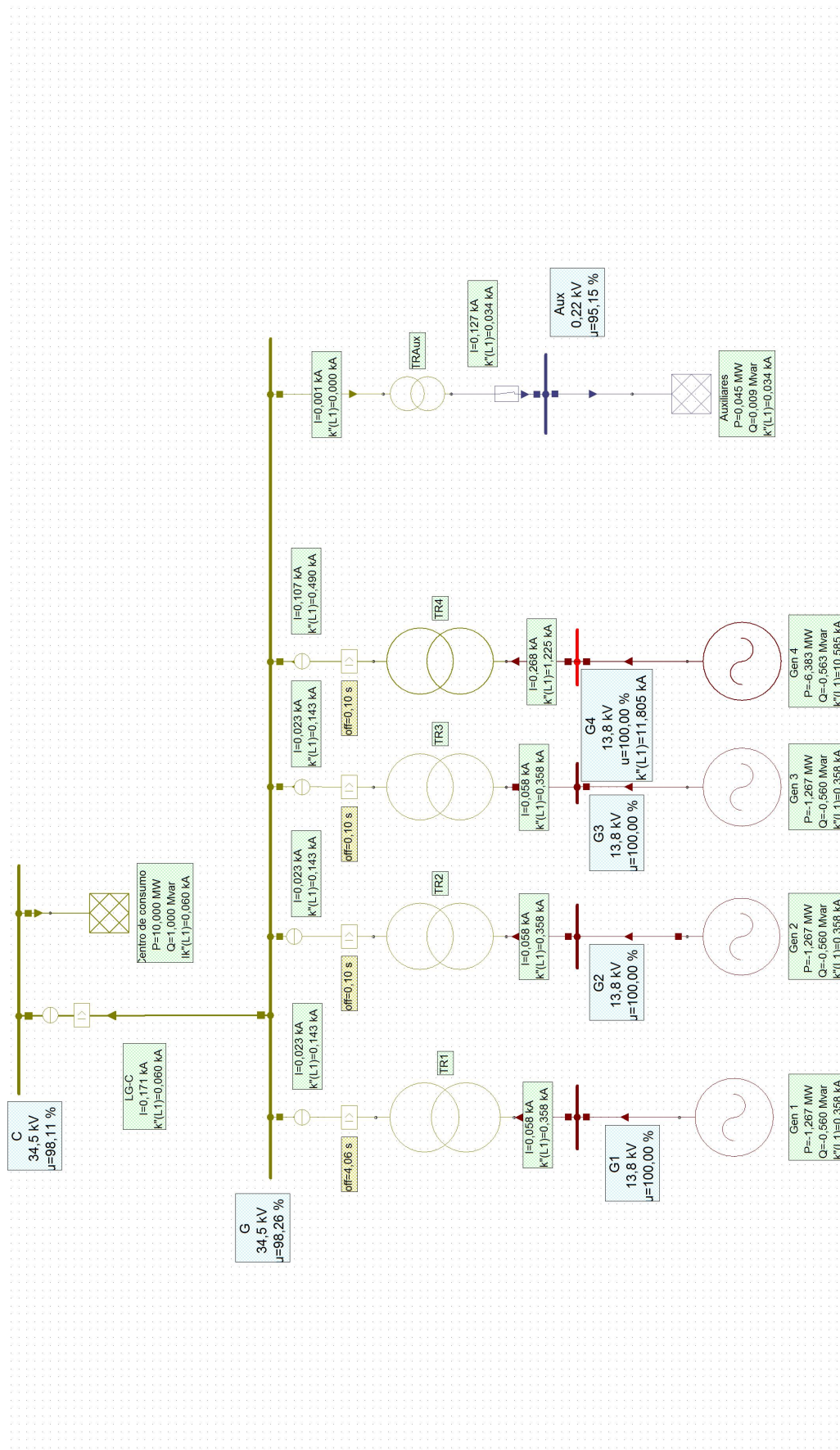


Figura 8.6: Tiempos de despeje y corrientes para falla trifásica en la barra del generador 4

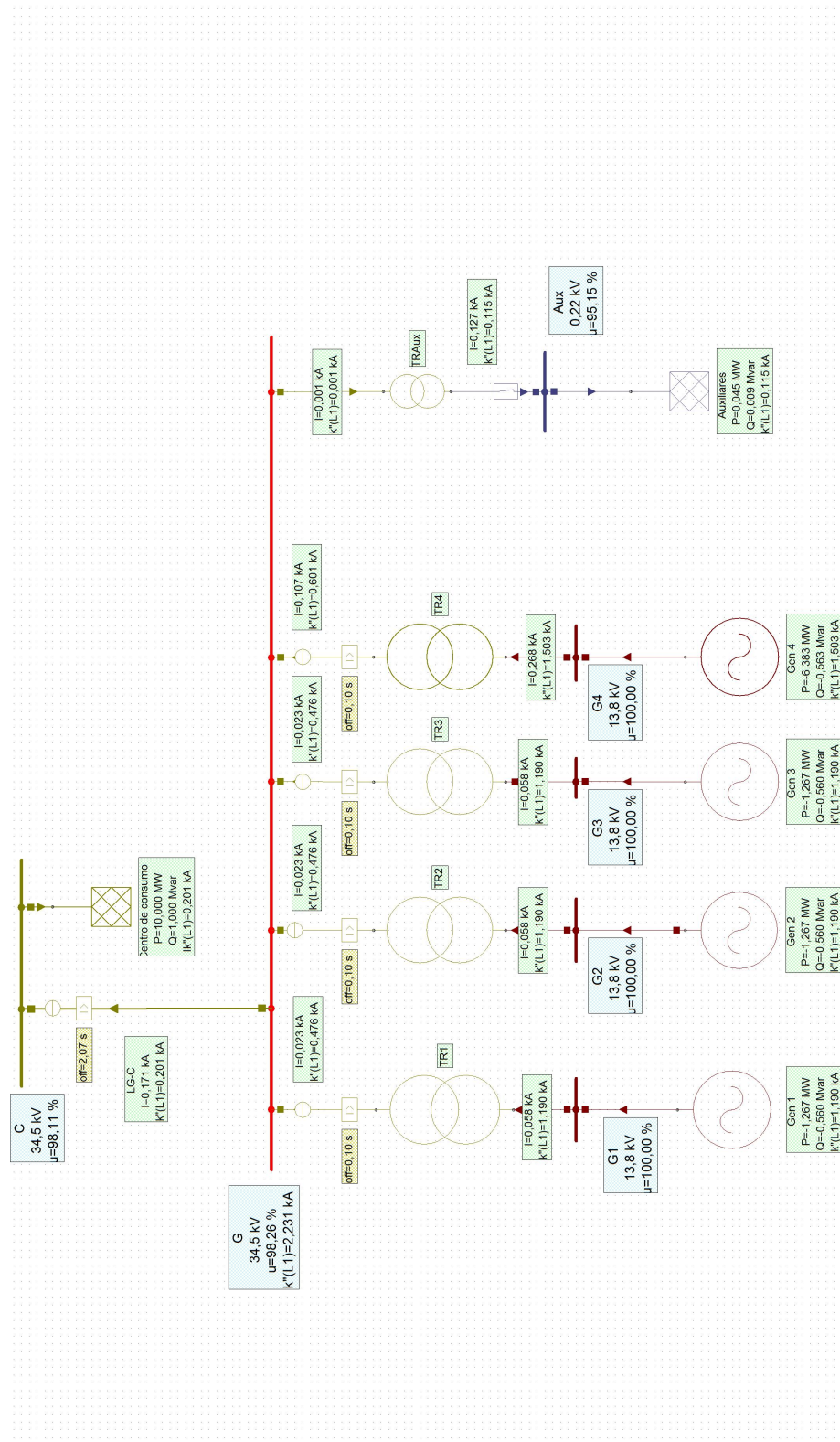


Figura 8.7: Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en el barraje principal de 34,5 kV

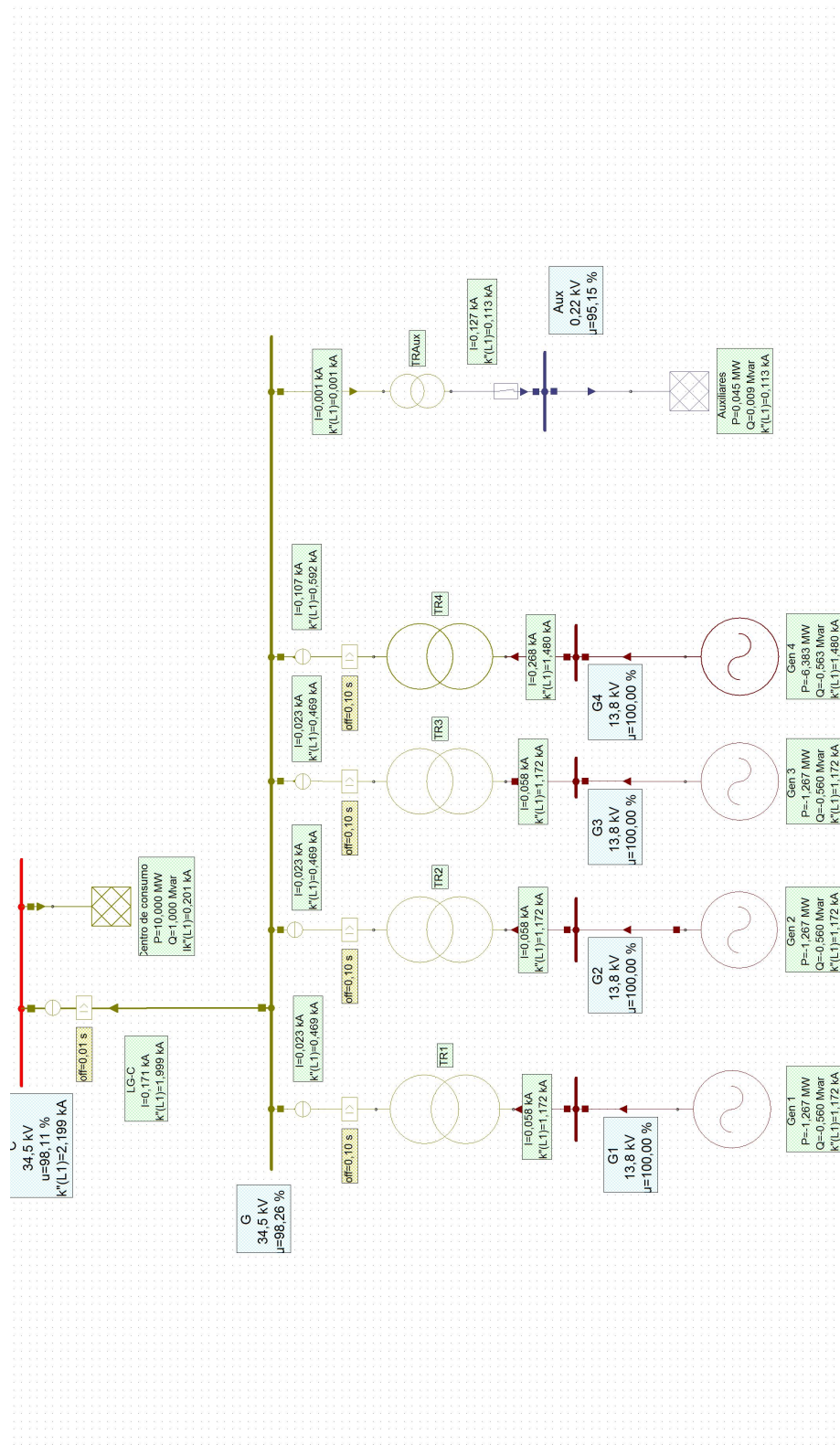


Figura 8.8: Corrientes y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra del centro de consumo

Tabla 8.1: Corrientes máximas de falla y tiempos de despeje de los dispositivos de protección

Dispositivo de protección	Corriente de falla (A)	Tiempo de despeje (s)	Barra fallada
PG1	501	0,1	G1
PG2	501	0,1	G2
PG3	501	0,1	G3
PG4	601	0,1	G
PAux	3145	0,02	Aux
PCarga	2000	0,01	C

#### 8.4.1.4. Falla trifásica en el barraje de servicios auxiliares

En la figura 8.9 se observan los valores de corriente para falla trifásica en la barra Aux

#### 8.4.1.5. Corrientes máximas de falla y tiempos de despeje de los dispositivos de protección

Para el análisis de riesgo ante flameo por arco, además de tener en cuenta las corrientes máximas de falla, con sus tiempos de despeje, se deben tener en cuenta las corrientes de falla que sin ser tan altas, ocasionen en los dispositivos de protección, tiempos de despeje largos. En la tabla 8.1 se resumen los valores máximos de corriente y tiempos de despeje para cada una de las fallas, teniendo en cuenta tiempos de despeje críticos que puedan llevar a valores elevados de energía incidente.

## 8.5. Análisis de riesgo ante flameo por arco

### 8.5.1. Análisis de riesgo ante flameo por arco en las celdas de protección de los generadores de 1750 kVA

El método empleado por la norma [IEEE 1584, 2002], exige que se hagan los cálculos de energía incidente con el 100 % de la corriente de falla. La corriente de falla fué tomada del análisis de cortocircuito en la tabla 8.1, por lo tanto los datos de entrada serán los siguientes:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,1 s (ver tabla 8.1).
- $I_f$ : corriente de falla: 0,501 kA (ver tabla 8.1).

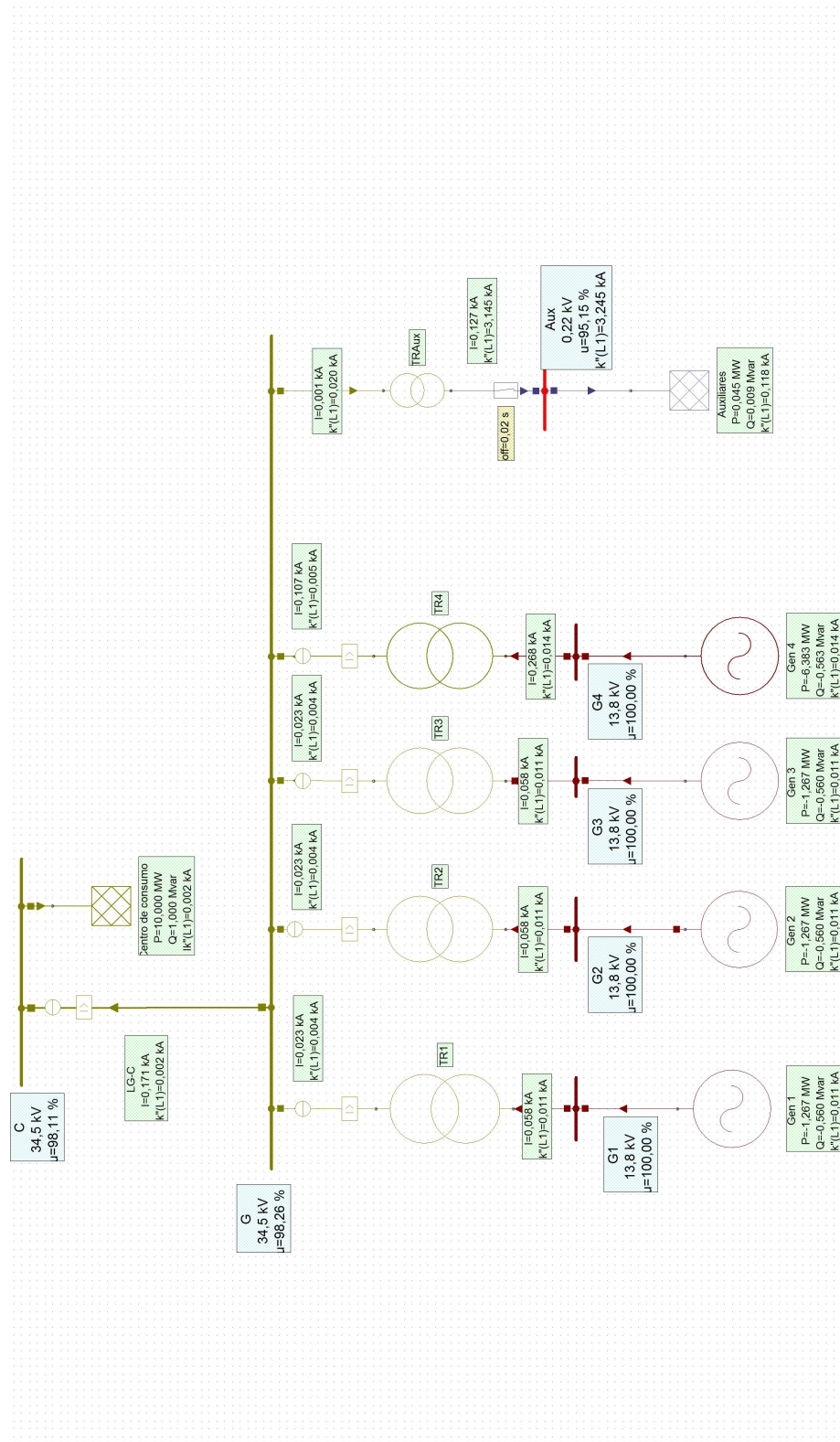


Figura 8.9: Corriente y tiempos de despeje para falla trifásica en la barra de servicios auxiliares

- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el 100 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.10:

- Energía incidente:  $5,9776 \text{ J/cm}^2$  ( $1,475 \text{ cal/cm}^2$ ).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 860,5045 mm.
- Categoría del riesgo: 1 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: camisa y pantalón resistentes al flameo o cobertor resistente al flameo (ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

El método usado por la norma [IEEE 1584, 2002], requiere hacer los cálculos de energía incidente al 85 % de la corriente de falla, por lo tanto los datos de entrada serán los siguientes:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 1,383 s (ver figura 8.11).
- $I_f$ : corriente de falla: 0,425 kA (ver tabla 8.1, se toma el 85 % de la corriente de falla).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el cálculo del tiempo de despeje del dispositivo de protección DP1, se recurre a la curva de tiempo inverso del mismo, figura 8.11 y se calcula el tiempo de despeje al 85 % de la corriente de falla.

Para el 85 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.12:

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.1 s

Corriente de Falla: 0.501 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 5.9776 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 1.4275 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 860.5045 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP: 0 Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 48kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.38	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.10: Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla

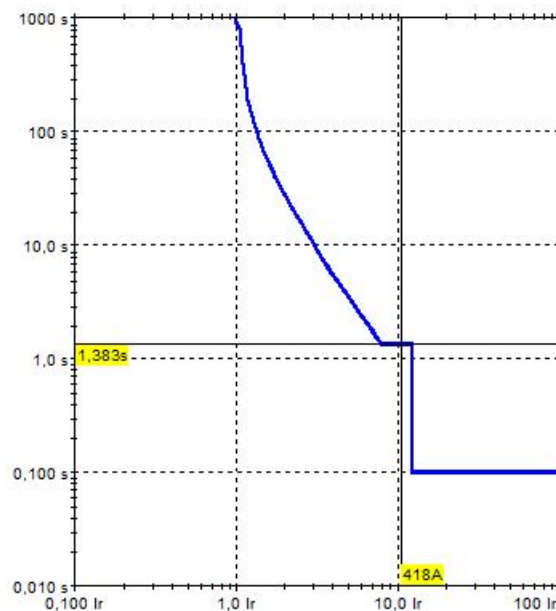


Figura 8.11: Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección DP1

- Energía incidente:  $70,1294 \text{ J/cm}^2$  ( $16,7496 \text{ cal/cm}^2$ ).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 2947,4051 mm.
- Categoría del riesgo: 3 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: ropa de algodón debajo de camisa, pantalón y cobertor resistentes al flameo (ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 2B (ver tabla 6.5, capítulo 6).

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 1.383 s

Corriente de Falla: 0.425 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 70.1294 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 16.7469 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 2947.4051 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 3

Tipo Ropa: Ropa de algodón debajo de camisa, pantalón v cobertor

Clase de EPP: 3

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 48kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.38	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.12: Datos de entrada y resultados del análisis para el 85 % de la corriente de falla

### 8.5.2. Análisis de riesgo ante flameo por arco en las celdas de protección del generador de 5000 kVA

Para la solución del ejemplo por el método de la norma [IEEE 1584, 2002], al 100 % de la corriente de falla. La corriente de falla fué tomada del análisis de cortocircuito en la tabla 8.1. Se requieren los siguientes datos de entrada:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,1 s (ver tabla 8.1).
- $I_f$ : corriente de falla: 0,601 kA (ver tabla 8.1).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el 100 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.13.

- Energía incidente: 7,1707 J/cm<sup>2</sup> (1,7124 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 942,4786 mm.
- Categoría del riesgo: 1 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: camisa, pantalón o cobertores resistentes al flameo (ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

El método usado por la norma [IEEE 1584, 2002], requiere hacer los cálculos de energía incidente con al 85 % de la corriente de falla, por lo tanto los datos de entrada serán los siguientes:

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.1 s

Corriente de Falla: 0.601 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 7.1707 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 1.7124 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 942.4786 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP: 0

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 48kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	48.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.36	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.13: Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla

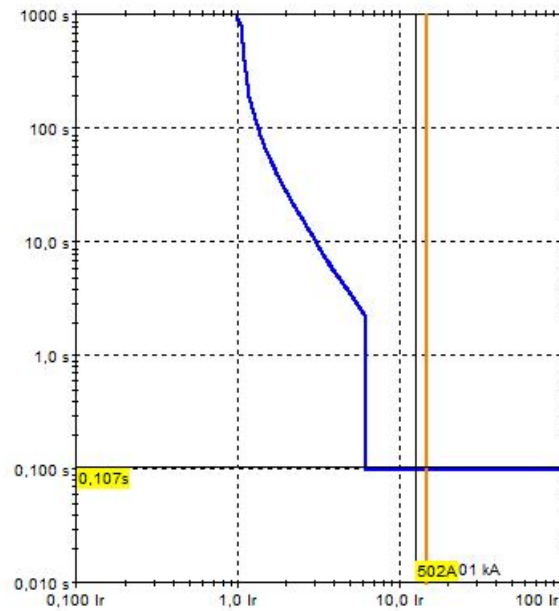


Figura 8.14: Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección PG4

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,107 s (ver figura 8.14).
- $I_f$ : corriente de falla: 0,510 kA (ver tabla 8.1, se toma el 85 % de la corriente de falla).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el cálculo del tiempo de despeje del dispositivo de protección DP1, se recurre a la curva de tiempo inverso del mismo, figura 8.14 y se calcula el tiempo de despeje al 85 % de la corriente de falla.

Para el 85 % de la corriente de falla, resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.15.

- Energía incidente: 6,5109 J/cm<sup>2</sup> (1,5548 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 898,0722 mm.
- Categoría del riesgo: 1 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: camisa, pantalón o cobertores resistentes al flameo (ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).

- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

### 8.5.3. Análisis de riesgo ante flameo por arco en el barraje de servicios auxiliares

Para la solución del ejemplo por el método [IEEE 1584, 2002], se requieren los siguientes datos de entrada, para el análisis del riesgo:

- $V$ : nivel de tensión: 0,220 kV.
- $D$ : distancia entre conductores: 25 mm (ver tabla C.2, apéndice C).
- $I_f$ : corriente de falla: 3,145 kA (ver tabla 8.1).
- $D$ : distancia al punto posible de arco: 455 mm (ver tabla C.2, apéndice C).
- Se considera que el dispositivo de protección a analizar está dentro de un encerramiento (pánel de distribución).
- Se considera que hay sistema de puesta a tierra.
- $x$ : exponente de distancia: 1,641 (ver tabla 4.1, capítulo 4).

El programa calcula, la corriente de arco plena y la corriente de arco reducida

- $I_A$ : corriente de arco plena: 1,9507 kA.
- $I_A$ : corriente de arco reducida: 1,6581 kA.

El tiempo de despeje de la corriente de arco plena y de corriente de arco reducida se hallan de las figuras 8.16 y 8.17, donde se muestra la curva de tiempo inverso del interruptor automático.

- $t$ : tiempo de despeje de la corriente de arco plena: 0,025 s (ver figura 8.16).

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.107 s

Corriente de Falla: 0.51 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 6.5109 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 1.5548 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 898.0722 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP: 0

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.36	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.15: Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla

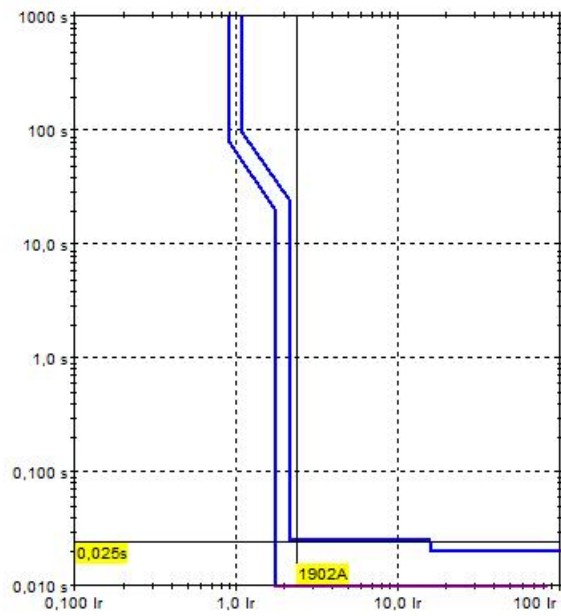


Figura 8.16: Tiempo de despeje de la corriente de arco plena

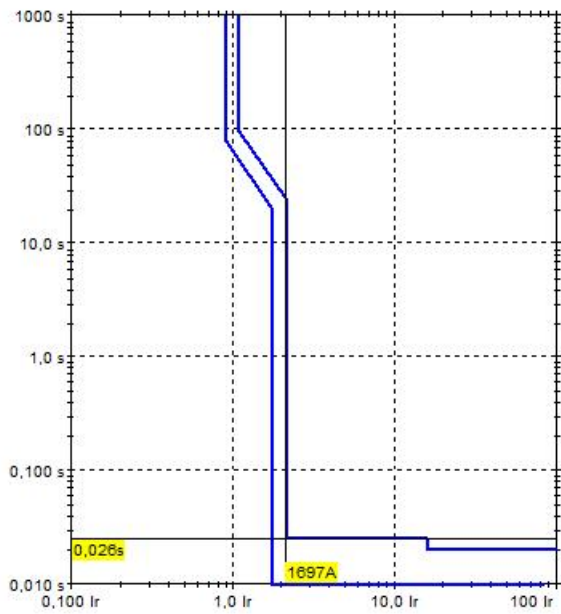


Figura 8.17: Tiempo de despeje de la corriente de arco reducida

- t: tiempo de despeje de la corriente de arco plena: 0,026 s (ver figura 8.17).

Los resultados del análisis de la barra de servicios auxiliares y datos de entrada requeridos, se muestran en la figura 8.18:

- Energía incidente máxima: 0,5980 J/cm<sup>2</sup> (0,1428 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 124,7386 mm.
- Categoría del riesgo: 0 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: materiales como algodón sin tratamiento, lana, seda o mezcla de estos materiales con un peso de tejido mínimo de 152,58 g/m<sup>2</sup> (4,5 oz/yd<sup>2</sup>). (Ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 1,07 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: evitar contacto (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: evitar contacto (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 00 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

#### 8.5.4. Análisis de riesgo ante flameo por arco en el barraje de carga

Para la realización del análisis de riesgo ante flameo por arco en la barra de carga del centro de generación, mediante la norma [IEEE 1584, 2002], se requieren los siguientes datos de entrada al 100 % de la corriente de falla:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,01 s (ver tabla 8.1).
- I<sub>f</sub>: corriente de falla: 2 kA (ver tabla 8.1).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Configuraciones

Análisis en encerramientos

Análisis al aire libre

Puesta a Tierra

Con puesta a Tierra

Sin puesta a Tierra

Corrientes de Arco

Corriente de arco plena: 1.9507 kA

Corriente de arco reducida: 1.6581 kA

Nivel de Tensión: 0.22 kV

Distancia al punto de arco: 455 mm

Corriente de Falla: 3.145 kA

Separación entre fases: 25 mm

Exponente de distancia: 1.641 mm

Tiempo de despeje a la corriente de arco plena: 0.025 s

Tiempo de despeje a la corriente de arco reducida: 0.026 s

Calcular 1

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 0.59801 J/cm<sup>2</sup>

Energía Incidente Máxima: 0.14281 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 124.7386 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 0

Tipo Ropa: Materiales como algodón sin tratamiento, lana

Clase de EPP: 0

Clase de Guantes: 00

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
2	50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
3	301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318

Figura 8.18: Datos de entrada y resultados del análisis

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.01 s

Corriente de Falla: 2 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 2.3863 J/cm<sup>2</sup>

Energía Incidente Máxima: 0.56984 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 543.6874 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 0

Tipo Ropa: Materiales como algodón sin tratamiento lana

Clase de EPP: 0

Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.38	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.19: Datos de entrada y resultados del análisis para el 100 % de la corriente de falla

Para el 100 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.19:

- Energía incidente: 2,3863 J/cm<sup>2</sup> (0,56984 cal/cm<sup>2</sup>).
- Distancia mínima de protección contra flameo: 543,6874 mm.
- Categoría del riesgo: 0 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: materiales como algodón sin tratamiento, lana, seda o mezcla de estos materiales con un peso de fábrica mínimo de 152,58 g/m<sup>2</sup> (4,5 oz/yd<sup>2</sup>). (Ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos): 3,05 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos): 2,44 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida: 0,8382 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido: 0,4318 m (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

El método usado por la norma [IEEE 1584, 2002], requiere hacer los cálculos de energía incidente con al 85 % de la corriente de falla, por lo tanto los datos de entrada serán los siguientes:

- V: nivel de tensión: 34,5 kV.
- t: tiempo de despeje de la corriente de arco: 0,061 s (ver tabla 8.20).
- I<sub>f</sub>: corriente de falla: 1,7 kA (ver tabla 8.1, se toma el 85 % de la corriente de falla).
- D: distancia al punto posible de arco: 787 mm (ver tabla A.1, apéndice A).

Para el cálculo del tiempo de despeje del dispositivo de protección PCarga, se recurre a la curva de tiempo inverso del mismo, figura 8.20 y se calcula el tiempo de despeje al 85 % de la corriente de falla.

Para el 85 % de la corriente de falla, los resultados son los siguientes, los datos de entrada y los resultados se muestran en la figura 8.21:

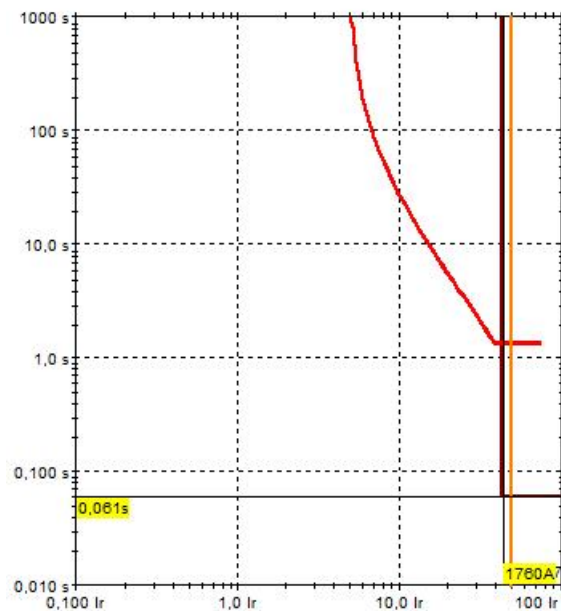


Figura 8.20: Curva de tiempo inverso del dispositivo de protección PCarga

- Energía incidente:  $12,3728 \text{ J/cm}^2$  ( $2,9546 \text{ cal/cm}^2$ ).
- Distancia mínima de protección contra flameo:  $1238,0086 \text{ mm}$ .
- Categoría del riesgo: 1 (ver tabla C.3, apéndice C).
- Descripción de la ropa de protección: camisa, pantalón o cobertores resistentes al flameo (ver tabla C.3, apéndice C).
- Límite seguro de aproximación (conductores fijos):  $3,05 \text{ m}$  (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite seguro de aproximación (conductores no fijos):  $2,44 \text{ m}$  (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación restringida:  $0,8382 \text{ m}$  (ver tabla A.1, apéndice A).
- Límite de aproximación prohibido:  $0,4318 \text{ m}$  (ver tabla A.1, apéndice A).
- Clase de los guantes de protección: 4 (ver tabla 6.2, capítulo 6).
- Clase de los elementos de protección personal: 0 (ver tabla 6.5, capítulo 6).

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV

Distancia al punto de arco: 787 mm

Tiempo de despeje: 0.061 s

Corriente de Falla: 1.7 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 12.3728 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 2.9546 cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo: 1238.0086 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1

Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al

Clase de EPP: 1 Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	36.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.8 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.38	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.21: Datos de entrada y resultados del análisis para el 85 % de la corriente de falla

Tabla 8.2: Resumen de los resultados del análisis de riesgo ante flameo por arco en el centro de generación

Dispositivo de protección	Energía cal/cm <sup>2</sup>	Límite flameo mm	Clase EPP	Descripción de la ropa	Clase guantes	Nivel Riesgo
PG1/PG2/PG3	16,7469	2947,40	2B	Algodón debajo de camisa, pantalón y cobertor FR.	4	3
PG4	1,7124	942,48	0	Camisa, pantalón o cobertores FR	4	1
PAux	0,1428	124,73	0	Algodón sin tratamiento, peso mínimo g/m <sup>2</sup>	00	0
PCarga	2,9546	1238,0086	0	Camisa, pantalón o cobertores FR	4	1

## 8.6. Análisis de resultados del estudio de análisis de riesgo ante flameo por arco

En la tabla 8.2 se resumen los resultados del análisis de riesgo ante un evento de flameo por arco, en las celdas de protección de los generadores, en los paneles de distribución del barraje de servicios auxiliares y en la celda de protección del barraje de carga.

La energía incidente de la segunda columna se calculó al límite restringido (ver tabla A.1, apéndice A).

El límite de protección contra flameo, es la distancia a la cual la energía incidente es de 1,2 cal/cm<sup>2</sup> sin ropa de protección personal. Es la distancia a la cual se tendrán quemaduras curables de 2 grado.

La clase de los guantes se basa en la clasificación de la tabla 6.2, capítulo 6.

La clase de los EPP (elementos de protección personal) se basa en la tabla 6.5, capítulo 6 y la clasificación se hace en base a la energía incidente.

## 8.7. Reducción del riesgo en las celdas de protección

Una de las formas descritas anteriormente en el capítulo 5, era la reducción de los tiempos de despeje de las corrientes de arco. Mediante la coordinación correcta de los dispositivos de protección de los generadores, se puede disminuir el tiempo de despeje al 85 % de la corriente de falla el cual, actualmente está en 1,383 s, llevando a un nivel de energía incidente elevado y a una categoría de riesgo 3.

En la figura 8.23 se muestran los ajustes encontrados y en la figura 8.22 se muestran los ajustes realizados.

Como se puede observar con el ajuste del disparo instantáneo del dispositivo, se logra una reducción del tiempo de despeje al 85 % de 1,383 s a 0,1 s.

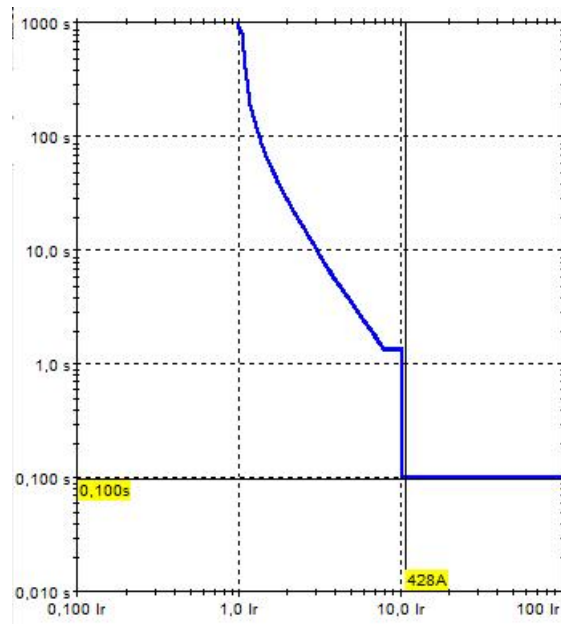


Figura 8.22: Ajustes realizados al dispositivo de protección de los generadores

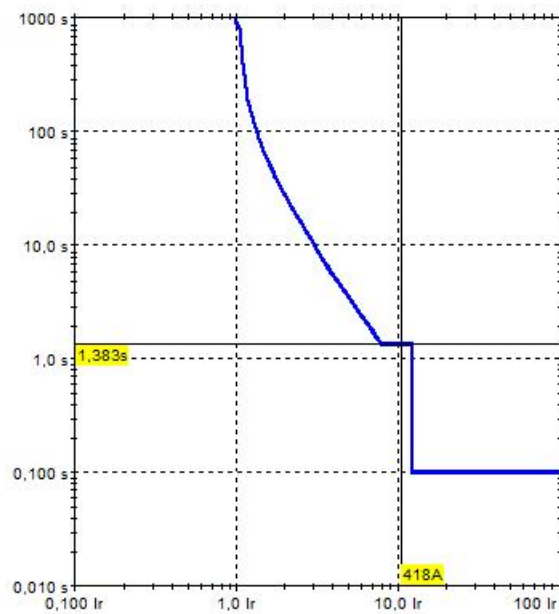


Figura 8.23: Ajustes encontrados en el dispositivo de protección de los generadores

Como se puede ver en la figura 8.24, donde se muestran los resultados, con la coordinación del tiempo de despeje, se logra una reducción del riesgo del nivel 3 al nivel 1.

**FLAMEO**

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión: 34.5 kV  
 Distancia al punto de arco: 787 mm  
 Tiempo de despeje: 0.1 s  
 Corriente de Falla: 0.425 kA

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima: 5.0708 J/cm<sup>2</sup>  
 Energía incidente Máxima: 1.2109 cal/cm<sup>2</sup>  
 Distancia mínima de protección contra flameo: 792.5538 mm

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 1  
 Tipo Ropa: Camisa, pantalón o cobertores resistentes al  
 Clase de EPP: 0 Clase de Guantes: 4

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	38.1 kV - 46kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	46.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9652	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128
9	138 kV - 145kV	3.36	3.05	1.093	0.9398

Figura 8.24: Análisis de riesgo después de realizada la coordinación del tiempo de despeje del dispositivo de protección

# Capítulo 9

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se plantea la metodología para evaluar el nivel riesgo ante un evento de flameo por arco.
- Esta metodología permite determinar los requerimientos de los elementos de protección personal y la ropa protectora, mediante la estimación de la energía incidente.
- Se establece el procedimiento para cuantificar el nivel de riesgo ante un evento de flameo por arco.
- La herramienta software recopila la metodología planteada por las normas [IEEE 1584, 2002] y [NFPA 70E, 2004], brindándole al usuario los resultados del análisis de riesgo ante flameo por arco, además de interpretarlos en términos del nivel requerido de elementos de protección personal.
- Un parámetro mínimo para garantizar la seguridad del personal, es el límite de protección contra flameo.
- Según lo establecido en [IEEE 1584, 2002], se establece que para determinar el nivel de riesgo ante flameo por arco, se seleccione como resultado del modelo el nivel de energía mas alto.

**9.1. PARA TRABAJOS FUTUROS SE RECOMIENDA**

- Comparación de la precisión de los métodos de estimación del riesgo, en búsqueda de cual de ellos se ajusta más a una situación específica.
- Realizar montajes para la realización de pruebas de resistencia de la ropa y elementos de protección personal, en laboratorio.

# Bibliografía

- [NFPA 70E, 2004] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Standard for electrical safety in the workplace. 2004.
- [Kaufmann y otro, 1960] KAUFMANN, R. H. & PAGE, J. C. Arcing fault protection for low voltage power distribution system, nature of the problem, AIEEE transactions power apparatus systems, 1960.
- [Stanback, 1977] STANBACK, H. I. Predicting damage from 277 V single phase to ground arcing faults, IEEE transaction on industry applications, 1977.
- [IEEE 1584, 2002] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. Guide for performing arc-flash hazard calculations, 2002.
- [NFPA 70, 2004] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. National electrical code, 2004.
- [Neal y otros,1997] THOMAS E. NEAL, ALLEN H. BINGHAM, RICHARD L. DOUGHTY. Protective Clothing Guidelines for Electric Arc Exposure, IEEE transaction on industry applications, 1997.
- [Doughty y otros, 2002.] RICHARD L. DOUGHTY, THOMAS E. NEAL, GENEVIEVE M. LAVERTY & HUGH HOAGLAND. Minimizing Burn Injury: Electric-Arc Hazard Assessment and Personnel Protection, IEEE Industry application magazine, 2002.
- [Weigel y otros] J. WEIGEL, J. CLOUGH, B. LEUSCHNER. Understanding and Reducing Arc Flash Hazards, Square D/Schneider Electric.
- [Graham y otros, 2004] AIDAN M. GRAHAM, GARY GATES & MICHAEL HODDER. Currents methods for conducting an arc flash hazard analysis, IEEE, 2004.

- [Wallace y otros, 2007] H. WALLACE TINSLEY, MICHAEL HODDER & AIDAN GRAHAM. Beyond the calculations: life after arc flash analysis, IEEE, 2007.
- [Doan y otros, 2004] DANIEL R. DOAN, H. LANDIS FLOYD, THOMAS E. NEAL. Comparison of Methods for Selecting Personal Protective Equipment for Arc Flash Hazards, IEEE transaction on industry applications, 2004.
- [Doan y otros,2004] DANIEL R. DOAN, JENNIFER SLIVKA, CHRIS BOHRER. IEEE. A summary of arc flash hazard assesments anda safety improvements, IEEE, 2004.
- [Inshaw y otro, 2005] CHRISTOFER INSHAW & ROBERT A. WILSON. Arc flash hazard analysis and mitigation, IEEE, 2005.
- [Neitzel] DENNIS K. NEITZEL. Protective Devices Maintenance as it Applies to the Arc/Flash Hazard, IEEE, 2004.
- [Gammon y otro, 2000] TAMMY L. GAMMON, JOHN H. MATTHEWS. Incident energy factors and simple 480-V incident energy equations, IEEE, 2000.
- [Wilkins y otros, 2005] WILKINGS M. ALLISON, M. LANG. Calculating Hazards: An improved method for arc-flash hazard analysis, IEEE industry applications magazine, 2005.
- [Ostrovsky, 2005] VLADIMIR OSTROVSKY. Performance of Voltage Rated Gloves in Arc Flash Exposures, IAS, 2005.
- [Hodder y otros, 2006] MICHAEL HODDER, WILLIAM VILCHECK, FLOYD CROYLE, DAVID MCCUE. Practical Arc-Flash Reduction: Methods in reducing hazardous areas in large industrial facilities, IEEE Industry Applications Magazine, 2006.
- [Tinsley y otros, 2006] H. WALLACE TINSLEY, MICHAEL HODDER, AIDAN M. GRAHAM. Arc Flash Hazard Calculations: Myths, facts and solutions, IEEE, 2006.
- [Lang y otros, 2007] M. LANG, THOMAS E. NEAL , R. WILKINS. Introduction to Arc Flash, ICEFA, 2007

- [Dunki-Jacobs, 1986] J.R. DUNKI-JACOBS. The Escalating Arcing Ground-Fault Phenomenon, IEEE, 1986.
- [Lee, 1982] RALPH H. LEE. The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. IEEE Transactions on Industry Applications, 1982.
- [Gibbs, 2004] D. GIBBS. Arc Flash Boundary Calculations Using Computer Software Tools, IAS, 2004
- [Neal y otro, 2005] THOMAS E. NEAL & ROGER F. PARRY. Shrapnel, pressure and noise, IEEE industry applications magazine, 2005.
- [Cadick y otros] JOHN CADICK, MARY CAPELLI-SHELLPFEFFER & DENNIS NEITZEL. Electrical safety handbook, MacGraw Hill, tercera edición, 2006.
- [Bingham y otros, 1997] ALLEN H. BINGHAM, RICHARD L. DOUGHTY & THOMAS E. NEAL. Testing update on protective clothing and equipment for electric arc exposure, IEEE, 1997.
- [Heberlein y otros, 1996] HEBERLEIN G. E., HIGGINS, J. A. & EPPERLY R. A. Report on enclosure internal arcing tests, IEEE Industry Applications Magazine, May/June 1996.
- [Jones y otros, 1995] JAMIL S., JONES R. A., MCCLUNG, L. B. Arc and flash burn hazards at various levels of an electrical system. Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society, 1995.
- [Doughty y otros, 2000] DOUGHTY, R. L., NEAL, T. E. & FLOYD, H. L. Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600 V power distribution systems, IEEE transaction on industry applications, 2000.

# Apéndice A

## Distancias de seguridad

### A.1. Introducción

En este apéndice se dan las distancias límites de seguridad para prevenir accidentes eléctricos.

### A.2. Límites de aproximación

Conservar una buena distancia segura desde los conductores eléctricos energizados, es un medio efectivo de mantener la seguridad eléctrica. En la medida en que la distancia entre una persona y un conductor expuesto disminuye, el potencial de accidentes eléctricos aumenta. En la figura A.1 se pueden apreciar estos límites.

#### **Límite de aproximación segura**

El personal no calificado está seguro cuando mantiene una distancia desde los conductores energizados, incluyendo el elemento conductor mas largo que esté sosteniendo, por lo tanto no puede entrar en contacto o disminuir el aislamiento que le da el aire. Esta distancia de seguridad se conoce como el límite de aproximación, El personal no debe cruzar el límite de protección contra flameo a menos que este usando los elementos de protección apropiados.

Se deben realizar los cálculos de la distancia mínima de flameo y si el límite va a ser cruzado se requiere el uso de trajes adecuados de protección contra flameo.

El personal que cruce el límite de aproximación y entre al espacio limitado, debe estar calificado para la realización del trabajo que va a ejecutar.

#### **Límite de aproximación restringida**

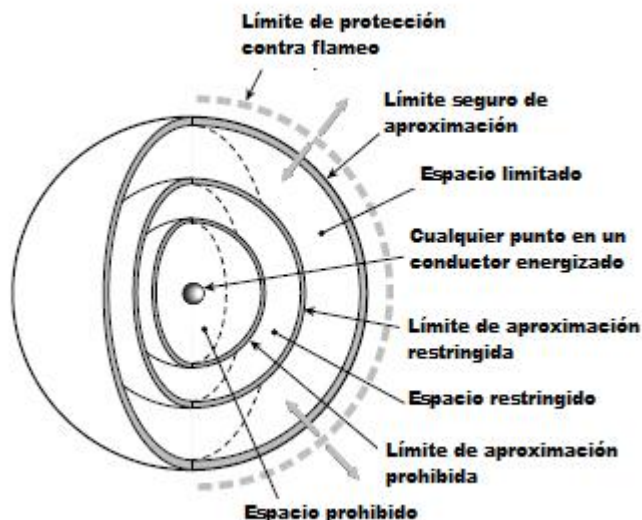


Figura A.1: Límites de aproximación  
Fuente: National fire protection association, NFPA 70E, 2004.

Al cruzar el límite restringido, y entrar al espacio restringido, el personal calificado debe hacer lo siguiente:

- Tener un plan documentado y aprobado por el personal responsable.
- Usar los elementos de protección personal adecuados para el trabajo cerca o en conductores energizados y con rango de tensión y energía, apropiado para el nivel en que se está trabajando.
- Tener la certeza de que ninguna parte del cuerpo entre en el espacio prohibido.
- Minimizar el riesgo por movimientos inadvertidos, manteniendo el cuerpo lo más lejos posible del espacio restringido, usando solo las partes del cuerpo protegidas en este espacio, necesarias para desarrollar el trabajo.

### Límite prohibido de aproximación

Cruzar el límite prohibido y entrar en el espacio prohibido, se considera lo mismo que hacer contacto con conductores energizados expuestos. Por lo tanto el personal calificado debe hacer lo siguiente:

Tabla A.1: Límites de aproximación a partes energizadas expuestas para prevenir electrocución

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Tensión de línea (kV)	Límite de aproximación segura		Límite restringido (m)	Límite prohibido (m)
	Conductor no fijo (m)	Conductor fijo (m)		
< 0,05	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
0,05-0,3	3,05	1,07	Evitar contacto	Evitar contacto
0.301 - 0.75	3,05	1,07	0,3	0,025
0,751 - 15	3,05	1,53	0,66	0,177
15,1 - 36	3,05	1,83	0,787	0,254
36,1 - 46	3,05	2,44	0,838	0,431
46.1 - 72.5	3,05	2,44	0,965	0,635
72,6 - 121	3,25	2,44	0,991	0,812
138 - 145	3,36	3,05	1,093	0,939
161 - 169	3,56	3,56	1,22	1,07
230 - 242	3,97	3,97	1,6	1,45
345 - 362	4,68	4,68	2,59	2,44
500 - 550	5,8	5,8	3,43	3,28
765 - 800	7,24	7,24	4,55	4,4

Fuente: National fire protection association, NFPA 70E, 2004

- Tener el entrenamiento específico, para trabajar en conductores eléctricos o partes de circuitos energizados.
- Tener un plan documentado, justificando la necesidad de la ejecución del trabajo a esa distancia.
- Realizar un análisis de riesgos.
- Tener los dos primeros pasos aprobados por las autoridades responsables.
- Usar los equipos de protección personal adecuados para trabajos cerca o en conductores energizados y con rango de voltaje y energía, apropiado para el nivel en que se está trabajando.

### Bases tomadas para las distancias de la tabla A.1

Las columnas de la 1 a la 5 de la tabla muestran varias distancias a desde conductores eléctricos o partes de circuito energizadas. Se incluyen las dimensiones que se deben guardar para tener un aislamiento básico por el aire. Las distancias mínimas de aislamiento por el aire

para tensiones menores o iguales a 72,5 kV se toman del ANSI/IEEE 516 2003. Las distancias mínimas de aislamiento por el aire requeridas para evitar el flameo son las siguientes:

- $V < 300V$ : 1 mm.
- $300V < V \leq 750V$ : 2 mm.
- $750V < V \leq 2kV$ : 5 mm.
- $2kV < V \leq 15kV$ : 3,9 cm.
- $15kV < V \leq 36kV$ : 16,1 cm.
- $36kV < V \leq 48,3kV$ : 25,4 cm.
- $48,3 < V \leq 72,5kV$ : 38,1 cm.
- $72,5kV < V \leq 121kV$ : 64,0 cm.
- $138kV < V \leq 145kV$ : 77,8 cm
- $161kV < V \leq 169kV$ : 91,5 cm.
- $230kV < V \leq 242kV$ : 1,281 m.
- $345kV < V \leq 362kV$ : 2,282 m.
- $500kV < V \leq 550kV$ : 3,112 m.
- $765kV < V \leq 800kV$ : 4,225 m.

1. Primera columna. Los rangos de voltaje han sido seleccionados a partir de un grupo de voltajes que requiere distancias similares de aproximación, basados en la suma de la distancia de soporte eléctrico y un factor de movimientos inadvertidos. El valor del límite superior del rango, es el máximo voltaje del voltaje nominal mas alto en el rango, basados en ANSI C.84.1 2005. Para sistemas monofásicos se selecciona el rango que es igual al voltaje máximo del sistema, fase a tierra, multiplicado por 1,732.
2. Segunda columna. Las distancias de esta columna están en las distancias dadas por OSHA para personal no calificado. Para tensiones por debajo de 50 kV a tierra, 3,05 m, mas 0,1 m por cada 1 kV por encima de los 50 kV.

3. Tercera columna. Las distancias dadas en esta columna, se basan en lo siguiente: **(a)**  $V \leq 750V$  se usó tabla 110.26(A)(1),[NFPA 70, 2004] espacios de trabajo, condición 2 para tensiones de rango 151 V a 600 V. **(b)**  $750V < V \leq 145kV$ , se usó tabla 110.34(A),[NFPA 70, 2004] espacios de trabajo condición 2. **(c)**  $V > 145kV$ , se usó OSHA de la misma forma que se empleó en la segunda columna.
4. Cuarta columna. Las distancias están basadas en la suma de las distancias mínimas de protección contra flameo y las distancias de movimientos inadvertidos **(a)**  $V \leq 300V$ , evitar contacto. **(b)**  $300V < V \leq 750V$ , se le suma 30.4 cm por movimientos inadvertidos, este valor se basa en la experiencia y precauciones en sistemas de 120/240 V. **(c)**  $V > 72,5kV$ , se suma 30.4 cm por movimientos inadvertidos.
5. Quinta columna. Las distancias mostradas en esta columna están basadas en lo siguiente **(a)**  $V \leq 300V$ , evitar contacto. **(b)**  $300V < V \leq 750V$ , usar tabla 230.51(C) [NFPA 70, 2004], separaciones entre conductores y superficies de 600 V no expuestas al clima. **(c)**  $750V < V \leq 2kV$ , usar valores que se ajusten con los valores adyacentes. **(d)**  $2kV < V \leq 72,5kV$ , usar tabla 490.24 [NFPA 70, 2004], distancias mínimas entre partes vivas, valore a la intemperie, para tensiones fase a tierra **(e)**  $V > 75kV$ , sumar 15,2 cm por movimientos inadvertidos.

# Apéndice B

## Manual del usuario

### B.1. Introducción

La herramienta computacional es una aplicación desarrollada en Matlab, mediante una interfaz de usuario que plantea inicialmente la estimación de la energía incidente, por el método de las normas IEEE 1584 2002 y NFPA 70E 2004.

Como una segunda aplicación y en base a la energía incidente, el programa halla la clase y descripción de ropa de protección a usar, la distancia mínima de protección contra flameo, los límites de aproximación, la clase de los guantes de protección a usar y en caso de que la energía incidente alcance valores muy elevados, plantea alternativas para su reducción.

### B.2. Requerimientos

Los requerimientos mínimos de hardware para utilizar esta herramienta son:

- Procesador Pentium III, Athlon 2000 o superiores.
- Microsoft Windows XP/Vista, Mac OS, Linux (Ubuntu), o versiones siguientes.
- Memoria RAM de 512 MB, se recomienda de 1 G
- Tarjeta gráfica de 16 Bits
- 500 MB de espacio en disco duro.

### B.3. Instalación

Para utilizar este software, inicialmente se necesita guardar la carpeta llamada "flameo por arco" en el equipo, el cual debe tener instalado Matlab 2008a. Para ello:

1. Seleccione desde el CD del software la carpeta "flameo por arco" y guárdela en el escritorio del PC que desee utilizar.
2. Seguidamente puede continuar con el proceso de ejecución.

Nota: en la carpeta "flameo por arco" debe almacenar los ejecutables: flameo.fig, flameo.m,uitable y otros archivos requeridos para su ejecución. Es necesario que los archivos bases de la herramienta no sean retirados de la carpeta, para garantizar el correcto funcionamiento.

## B.4. Ejecución

Para ejecutar el programa se le solicita al usuario:

- Realizar un estudio previo de cortocircuito del sistema a analizar, calculando las corrientes de falla trifásica más altas y los tiempos de despeje de las mismas, por los dispositivos de protección.
- Tener disponibles las curvas de despeje de los dispositivos de protección.
- Verificar si el dispositivo de protección (interruptor automático en caja moldeada o fusible), que se tiene en el sitio donde se va a realizar el análisis, corresponde a alguno de los enumerados por el programa, verificar que estén dentro de los rangos de aplicabilidad.
- Entregar los datos de entrada al programa, en la medida que los vaya solicitando.

### B.4.1. Ejecución inicial

Para su ejecución inicie abriendo Matlab, desde allí vaya al menú archivo y abra el ejecutable "flameo.m" que se encuentra en la carpeta "flameo por arco". Luego pulse F5 para correrlo y espere a que se abra una ventana de selección. Ver figura B.1. Esta ventana permite escoger el método por el cual se van a llevar a cabo los cálculos, bien sea por la norma IEEE 1584 2002 o por la norma NFPA 70E.

### B.4.2. Selección del método de IEEE 1584 2002 para el cálculo de los parámetros

Al seleccionar el método IEEE 1584, aparece la ventana "flameo".

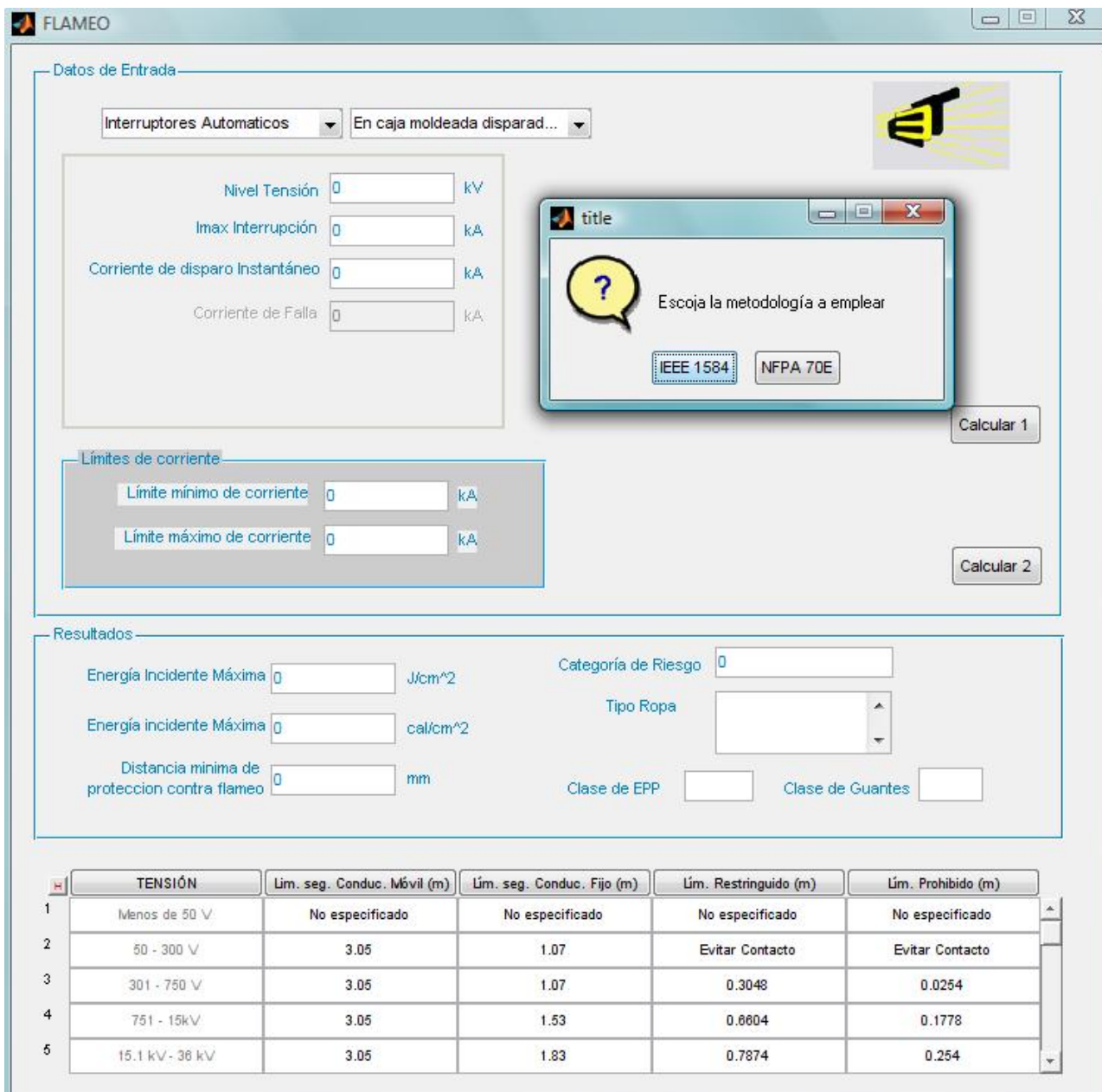


Figura B.1: Ventana de selección del método cálculo de los parámetros

Inicie seleccionando el dispositivo de protección que se ajuste al del sitio donde va a llevar a cabo el análisis. Para ello en el área A de la figura B.2, seleccione el tipo de dispositivo que se ajuste, seguidamente espere a que se actualice la entrada de datos.

#### **B.4.2.1. Selección de interruptores automáticos en caja moldeada**

Si la selección de dispositivo de protección, corresponde a interruptores automáticos en caja moldeada, aparecerá la ventana mostrada en la figura B.2. En la cual se muestran las siguientes áreas:

#### **Área A: Datos de entrada**

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.2.

#### **Entradas Escritas**

- Nivel de tensión en kV.
- Corriente máxima de interrupción del interruptor automático en kA.
- Corriente de disparo instantáneo en kA.

#### **Área B: Límites de corriente del modelo**

Seguidamente y al presionar el botón superior “Calcular 1”, el programa halla los límites de corriente de falla, para los cuales el modelo es aplicable ( $I_1 < I_{bf} < I_2$ ) los cuales se muestran en esta área. Además se despliega la ventana mostrada en la figura B.3, con los límites de corriente e instrucciones para continuar con la ejecución del programa.

#### **Área C: Datos de salida**

Al presionar el botón “Calcular 2”, en esta área se muestran los resultados del modelo. Ver figura B.2.

#### **Salidas**

- Energía incidente máxima en cal/cm<sup>2</sup>.

**Datos de Entrada**

Interrupedores Automaticos  En caja moldeada disparad...

Nivel Tensión  kV

I<sub>max</sub> Interrupción  kA

Corriente de disparo Instantáneo  kA

Corriente de Falla  kA

**ÁREA A**

**Límites de corriente**

Límite mínimo de corriente  kA

Límite máximo de corriente  kA

**ÁREA B**

**Resultados**

Energía Incidente Máxima  J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima  cal/cm<sup>2</sup>

Distancia mínima de protección contra flameo  mm

Categoría de Riesgo

Tipo Ropa

Clase de EPP  Clase de Guantes

**ÁREA C**

TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Evitar Contacto
Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	Evitar Contacto
50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
15.1 kV- 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

**ÁREA D**

Figura B.2: Ventana desplegada, para los cálculos en caso de selección de interruptores automáticos

**Datos de Entrada**

Interruptores Automaticos | En caja moldeada disparad...

Nivel Tensión: 0 kV  
 I<sub>max</sub> Interrupción: 0 kA  
 Corriente de disparo Instantáneo: 0 kA  
 Corriente de Falla: 0 kA

**Límites de corriente**

Límite mínimo de corriente: 0 kA  
 Límite máximo de corriente: 0 kA

**Resultados**

Energía Incidente Máxima: 0 J/cm<sup>2</sup>  
 Energía incidente Máxima: 0 cal/cm<sup>2</sup>  
 Distancia mínima de protección contra flameo: 0 mm

Categoría de Riesgo: 0  
 Tipo Ropa: [dropdown]  
 Clase de EPP: [input] Clase de Guantes: [input]

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
1	Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
2	50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
3	301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

Figura B.3: Ventana desplegada con los límites de corriente del modelo

- Energía incidente máxima en  $J/cm^2$ .
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.
- Descripción de la ropa de protección necesaria, para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.
- Clase de los guantes de protección.

### Área D: Tabla

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión. Ver figura B.2.

#### B.4.2.2. Selección de fusibles

Primero se debe seleccionar la clase de fusible, que esté instalado en el lugar donde se va a realizar el estudio. Ver figura B.4, área A.

### Área A: Datos de entrada

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.4.

#### Entradas Escritas

- La corriente de falla en kA.

Al digitar la corriente de falla, presione el botón “Calcular 2”, si la corriente de falla no está dentro de los rangos de aplicabilidad del modelo, se despliega un mensaje de error. Ver figura B.5.

### Área B: Datos de salida

Al presionar el botón “Calcular 2”, en esta área se muestran los resultados del modelo. Ver figura B.4.

The screenshot shows the FLAMEO software interface with three highlighted areas:

- ÁREA A:** Input fields for fuse selection, including a dropdown for 'Fusibles' (set to 'Clase L 1601-2000 A') and a text box for 'Corriente de falla de Contacto' (set to '0 kA').
- ÁREA B:** Output fields for calculation results, including 'Energía Incidente Máxima' (0 J/cm<sup>2</sup> and 0 cal/cm<sup>2</sup>), 'Categoría de Riesgo' (0), 'Tipo Ropa', 'Clase de EPP', and 'Clase de Guantes'.
- ÁREA C:** A table with safety limits for different voltage levels.

TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Restringido (m)
1 Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
2 50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
3 301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
4 751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
5 15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

Figura B.4: Ventana desplegada, para los cálculos en caso de selección de fusibles

**Datos de Entrada**

Fusibles: Clase L 801-1200 A

Corriente de falla de Contacto: 1 kA

**Error**

Corriente de Falla fuera del rango del modelo

OK

Calcular 2

**Resultados**

Energía Incidente Máxima: 43.3881 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima: 10.3611 cal/cm<sup>2</sup>

Categoría de Riesgo: Categoría del riesgo 3

Tipo Ropa: Ropa de algodón debajo de camisa, pantalón y cobertor

Clase de EPP: 2B

Clase de Guantes: 1

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.0004	0.1778
5	15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
6	38.1 kV - 48kV	3.05	2.44	0.8382	0.4318
7	48.1 kV - 72.5 kV	3.05	2.44	0.9052	0.635
8	72.6 kV - 121 kV	3.25	2.44	0.991	0.8128

Figura B.5: Mensaje de error desplegado

### Salidas

- Energía incidente máxima en cal/cm<sup>2</sup>.
- Energía incidente máxima en J/cm<sup>2</sup>.
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.
- Descripción de la ropa de protección necesaria para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.
- Clase de los guantes de protección.
- Tabla con los límites de aproximación.

### Área C: Tabla

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión, el programa selecciona en amarillo, la fila de la tabla para la cual el modelo aplica. Ver figura B.4.

#### B.4.2.3. No aplica ningún dispositivo de protección

- Para niveles de tensión inferiores o iguales a 15 kV

### Área A: Selección de opciones

En esta área se especifica, la configuración del sistema que se va a analizar. Ver figura B.6.

- Especificar la configuración, si es encerramiento o al aire libre.
- Especificar si el sistema tiene puesta a tierra o no.

Con los anteriores datos, el programa calcula el nivel de energía incidente y escoge como resultado el valor mas alto de energía incidente.

### Área B: Datos de entrada

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.6.

FLAMEO

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

**ÁREA A**

Configuraciones

Análisis en encerramientos

Análisis al aire libre

Puesta a Tierra

Con puesta a Tierra

Sin puesta a Tierra

**ÁREA B**

Nivel de Tensión 0 kV

Distancia al punto de arco 0 mm

Corriente de Falla 0 kA

Separación entre fases 0 mm

Exponente de distancia 0 mm

Calcular 1

Corrientes de Arco

Corriente de arco plena 0 kA

Tiempo de despeje a la corriente de arco plena 0 s

Corriente de arco reducida 0 kA

Tiempo de despeje a la corriente de arco reducida 0 s

Calcular 2

**ÁREA C**

Resultados

Energía Incidente Máxima 0 J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima 0 cal/cm<sup>2</sup>

Categoría de Riesgo 0

Tipo Ropa

Clase de EPP

Clase de Guantes

**ÁREA D**

TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. No Restringido (m)
Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
15.1 kV- 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

**ÁREA E**

Figura B.6: Ventana desplegada, para los cálculos en caso no aplicar ningún dispositivo de protección, tensiones menores a 15 kV

### Entradas Escritas

- Nivel de tensión en kV.
- Distancia al punto de arco en mm.
- Corriente de falla en kA.
- Distancia entre conductores en mm.
- Exponente de distancia.

### Área C: Cálculo de la corriente de arco

Al digitar estos datos y hacer las selecciones del área A, presione el botón “calcular 1” y el programa calcula las corrientes de arco plena y reducida, es decir al 100 % y 85 %, posteriormente y en base a las curvas de tiempo inverso del dispositivo de protección que tenga en el sitio de trabajo, digite los siguientes datos de entrada:

- Tiempo de despeje de la corriente de arco plena en segundos.
- Tiempo de despeje de la corriente de arco reducida en segundos.

### Área D: Datos de salida

Después de introducir los datos requeridos y al presionar el botón “Calcular 2”, el programa muestra los siguientes datos. Ver figura B.6.

### Salidas

- Energía incidente máxima en  $\text{cal}/\text{cm}^2$ .
- Energía incidente máxima en  $\text{J}/\text{cm}^2$ .
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.
- Descripción de la ropa de protección necesaria para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.

- Clase de los guantes de protección.
- Tabla con los límites de aproximación.

### Área E: Tabla

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión.
- **Para niveles de tensión superiores a 15 kV**

### Área A: Datos de entrada

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.7.

#### Entradas Escritas

- Nivel de tensión en kV.
- Distancia al punto de arco en mm.
- Corriente de falla en kA.
- Tiempo de despeje de la corriente de falla.

### Área B: Datos de salida

Después de introducir los datos requeridos y al presionar el botón “Calcular 2”, el programa muestra los siguientes datos. Ver figura B.7.

#### Salidas

- Energía incidente máxima en  $\text{cal}/\text{cm}^2$ .
- Energía incidente máxima en  $\text{J}/\text{cm}^2$ .
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.

FLAMEO

Datos de Entrada

N/A - Ningun Dispositivo

Nivel de Tensión  kV

Distancia al punto de arco  mm

Tiempo de despeje  s

Corriente de Falla  kA

**ÁREA A**

Calcular 2

Resultados

Energía Incidente Máxima  J/cm<sup>2</sup>

Energía incidente Máxima  cal/cm<sup>2</sup>

Categoría de Riesgo

Tipo Ropa

Clase de EPP

Clase de Guantes

**ÁREA B**

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. P
1	Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No es
2	50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	Evitar Contacto
3	301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
5	15.1 kV- 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

**ÁREA C**

Figura B.7: Ventana desplegada, para los cálculos en caso no aplicar ningún dispositivo de protección, tensiones mayores a 15 kV

- Descripción de la ropa de protección necesaria para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.
- Clase de los guantes de protección.
- Tabla con los límites de aproximación.

### **Área C: Tabla**

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión.

### **B.4.3. Selección del método de NFPA 70E para el cálculo de los parámetros**

#### **B.4.3.1. Para tensiones mayores o iguales a 600 V**

### **Área A: Datos de entrada**

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.8.

#### **Entradas Escritas**

- Nivel de tensión en kV
- La corriente de falla de contacto en kA.
- Tiempo de despeje en segundos.
- Distancia al punto posible de arco en mm.

### **Área B: Datos de salida**

Después de introducir los datos requeridos y al presionar el botón “Calcular”, el programa muestra los siguientes datos. Ver figura B.8.

The screenshot shows the FLAMEO software interface with three main sections highlighted by colored boxes:

- ÁREA A (Red border):** Input fields for:
  - Nivel Tensión: 0 kV
  - Corriente de falla de contacto: 0 kA
  - Tiempo de despeje: 0 s
  - Distancia al punto de arco: 0 mm
- ÁREA B (Orange border):** Output fields and risk category:
  - Energía Incidente Máxima: 0 J/cm<sup>2</sup>
  - Energía incidente Máxima: 0 cal/cm<sup>2</sup>
  - Distancia mínima de protección contra flameo: 0 mm
  - Categoría de Riesgo: 0
  - Tipo Ropa: [Dropdown menu]
  - Clase de EPP: [Input field]
  - Clase de Guantes: [Input field]
- ÁREA C (Blue border):** A table with the following data:
 

TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Prohibido (m)
Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	
50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	
301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
15.1 kV - 38 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254

Figura B.8: Ventana desplegada, para los cálculos a tensiones mayores o iguales a 600 V

### Salidas

- Energía incidente máxima en  $\text{cal}/\text{cm}^2$ .
- Energía incidente máxima en  $\text{J}/\text{cm}^2$ .
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.
- Descripción de la ropa de protección necesaria para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.
- Clase de los guantes de protección.
- Tabla con los límites de aproximación.

### Área C: Tabla

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión, el programa selecciona en amarillo, la fila de la tabla para la cual el modelo aplica. Ver figura B.8.

#### B.4.3.2. Para tensiones menores a 600 V

### Área A: Datos de entrada

En esta área el programa pide al usuario algunos de los datos necesarios para la realización de los cálculos. Ver figura B.9.

### Entradas Escritas

- Nivel de tensión en kV
- La corriente de falla de contacto en kA.
- Tiempo de despeje en segundos.
- Distancia al punto posible de arco en mm.

The screenshot shows the FLAMEO software interface with the following sections:

- Datos de Entrada:**
  - ÁREA A (Red border):**
    - Nivel Tensión: 0.5 kV
    - Corriente de falla de contacto: 0 kA
    - Tiempo de despeje: 0 s
    - Distancia al punto de arco: 0 mm
  - ÁREA B (Green border):**
    - Configuraciones:
      - Análisis en encerramientos
      - Análisis al aire libre
  - Calcular:** Button to perform the calculation.
- Resultados:**
  - Energía Incidente Máxima: 0 J/cm<sup>2</sup>
  - Energía incidente Máxima: 0 cal/cm<sup>2</sup>
  - Distancia mínima de protección contra flameo: 0 mm
  - Categoría de Riesgo: 0
  - Tipo Ropa: [Dropdown menu]
  - Clase de EPP: [Input field]
  - Clase de Guantes: [Input field]
  - ÁREA C (Blue border):** Label for the results section.
- Tabla de Resultados:**

	TENSIÓN	Lím. seg. Conduc. Móvil (m)	Lím. seg. Conduc. Fijo (m)	Lím. Restringido (m)	Lím. Expon. (s)
1	Menos de 50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
2	50 - 300 V	3.05	1.07	Evitar Contacto	0.0254
3	301 - 750 V	3.05	1.07	0.3048	0.0254
4	751 - 15kV	3.05	1.53	0.6604	0.1778
5	15.1 kV - 36 kV	3.05	1.83	0.7874	0.254
- ÁREA D (Orange border):** Label for the table section.

Figura B.9: Ventana desplegada, para los cálculos a tensiones menores a 600 V

## Área B: Selección de opciones

En esta área se especifica, la configuración del sistema que se va a analizar. Ver figura B.9.

- Especificar la configuración, si es encerramiento o al aire libre.

## Área C: Datos de salida

Después de introducir los datos requeridos y al presionar el botón “Calcular”, el programa muestra los siguientes datos. Ver figura B.9.

### Salidas

- Energía incidente máxima en  $\text{cal}/\text{cm}^2$ .
- Energía incidente máxima en  $\text{J}/\text{cm}^2$ .
- Distancia mínima de protección contra flameo en mm.
- Clase de riesgo.
- Descripción de la ropa de protección necesaria para el nivel de riesgo calculado.
- Clase de la ropa de protección.
- Clase de los guantes de protección.
- Tabla con los límites de aproximación.

## Área C: Tabla

- Tabla con las límites de aproximación, dependiendo del nivel de tensión, el programa selecciona en amarillo, la fila de la tabla para la cual el modelo aplica.

# Apéndice C

## Tablas de referencia

### C.1. Introducción

En el este capítulo se presentan las tablas usadas como referencia. Estas tablas son empleadas para determinar: las distancias típicas de trabajo en diferentes equipos, la separación típica entre conductores, el nivel de riesgo y los requerimientos de la ropa de protección dependiendo del nivel de energía incidente al cual el trabajador estará expuesto.

### C.2. Distancias típicas de trabajo en diferentes equipos

Las distancias mostradas en la tabla C.1 corresponden a la suma de las distancias desde el trabajador al equipo y desde el equipo a la fuente de arco potencial, dentro del equipo.

### C.3. Separación típica entre conductores

La tabla C.2 muestra las separaciones típicas entre conductores para diferentes equipos. Para tensiones mayores a 15 kV no se requiere la separación entre conductores para la estimación

Tabla C.1: Distancias típicas de trabajo en diferentes equipos

Clase de equipo	Distancias típicas de trabajo (mm)
Celdas de 15 kV	910
Celdas de 5 kV	910
Celdas de baja tensión	610
CCM y pánels de districón de baja tensión	455
Cable	455
Otros	Determinar en campo

Fuente: Fuente: IEEE 1584 2002. Guide for performing arc ash hazard calculations

Tabla C.2: Separación típica entre conductores de diferentes fases

Clase de equipo	Separación típica entre fases (mm)
Celdas de 15 kV	152
Celdas de 5 kV	104
Celdas de baja tensión	32
CCM y paneles de distribución de baja tensión	25
Cable	13
Otros	No se requiere

Fuente: Fuente: IEEE 1584 2002. Guide for performing arc flash hazard calculations

Tabla C.3: Niveles de riesgo y requerimientos de la ropa de protección personal

Nivel del riesgo	Sistemas típicos de ropa protectora Descripción de la ropa de protección (capas)	Requerimiento mínimo de resistencia al arco
0	Materiales como algodón que no se derrita con un peso de tejido 152,58 g/m <sup>2</sup> (1)	N/A
1	Camisa y pantalón FR o cobertor FR (1)	16,74 (4)
2	Ropa de algodón debajo de camisa convencional además camisa y pantalón FR (1 o 2)	33,47 (8)
3	Ropa de algodón debajo de pantalón, camisa y cobertor FR (2 o 3)	104,6 (25)
4	Ropa de algodón debajo de camisa y pantalón FR mas traje de protección contra flameo (3 o más)	167,36 (40)

Fuente: NFPA 70E 2004. Standard for electrical safety in the workplace

de la energía incidente.

## C.4. Niveles de riesgo y requerimientos de la ropa de protección personal

En la tabla C.3 se muestra la clasificación de los niveles de riesgo dependiendo de la energía incidente a la cual el personal pueda estar expuesto.