

EVALUAR LA ENERGÍA INCIDENTE PRODUCIDA POR EL ARCO ELÉCTRICO EN UNA
INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN, CON EL MÓDULO CÁLCULO DE
ARCO ELÉCTRICO DE LA HERRAMIENTA NEPLAN ELECTRICITY CON BASE EN LAS
NORMAS IEEE 1584 Y NFPA 70E.

CHRISTIAN CAMILO ARAGÓN CARVAJAL

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIGO DE CALI
2018

EVALUAR LA ENERGÍA INCIDENTE PRODUCIDA POR EL ARCO ELÉCTRICO EN UNA
INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN, CON EL MÓDULO CÁLCULO DE
ARCO ELÉCTRICO DE LA HERRAMIENTA NEPLAN ELECTRICITY CON BASE EN LAS
NORMAS IEEE 1584 Y NFPA 70E.

CHRISTIAN CAMILO ARAGÓN CARVAJAL

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Directores:

Profesor, Guillermo Aponte Mayor Ph.D

Profesor, Héctor Cadavid Ramírez Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIGO DE CALI
2018

DEDICATORIA

A mis padres gracias porque con esfuerzo, sacrificio, comprensión y amor me han acompañado y apoyado en esta etapa de mi vida, al recapitular he podido comprender que la educación y valores que inculcaron en mi han hecho la persona que soy hoy en día. Sin dudas ustedes se merecen este reconocimiento y mucho más porque siempre han creído en mis capacidades y sin importar los problemas o dificultades siempre he contado con ustedes cuando los he necesitado.

En verdad las palabras se quedan cortas para expresar todo el agradecimiento y respeto que tengo por mis padres, que han dejado a un lado sus propios deseos solo para que yo pueda cumplir mi sueño de estudiar esta hermosa carrera. Siempre me han dicho que el mejor regalo que los padres le pueden dejar a un hijo es el estudio, ahora más que nada entiendo esas palabras y espero que ustedes se sientan muy orgullosos.

A mi hermano por estar siempre pendiente en mi transcurso en la Universidad, por brindarme apoyo, colaboración y estar siempre dispuesto ayudarme, por ser un hermano ejemplar tanto en su vida personal, laboral y profesional, siempre estaré agradecido

A mi abuela por estar pendiente de mi formación y siempre estar dispuesta a colaborarme, a toda mi familia por su acompañamiento en esta importante etapa de mi vida y a todos los profesores por brindarme un poco de su conocimiento intelectual y personal.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a dos grandes personas que con su profesionalismo pero aún más importante la calidad de personas hicieron posible este trabajo de grado:

El profesor Guillermo Aponte Mayor, Ph. D. por su apoyo, colaboración y paciencia en este proceso, también por la confianza depositada en mi para la realización de esta labor y por su excelente supervisión. De la misma manera por el tiempo y conocimiento invertido en mi trabajo de grado.

El Profesor Héctor Cadavid Ramírez, Ph. D. por su disposición, colaboración y profesionalismo, igualmente por la atención prestada durante todo este proceso y por sus grandes aportes en este trabajo de grado.

CONTENIDO

CAPITULO 1	12
1.1 GENERALIDADES SOBRE EL ARCO ELÉCTRICO	12
1.2 PELIGROS SOBRE EL ARCO ELÉCTRICO	12
1.2.1 lesión por quemadura	13
1.2.2 Piel humana	13
1.2.3 Lesión por quemaduras en la piel humana y clasificación	14
1.2.4 Peligros eléctricos	16
1.3 POSIBLES CAUSAS DEL ARCO ELÉCTRICO	17
1.4 LIMITACIÓN Y PREVENCIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO	18
1.5 GENERALIDADES SOBRE LA ENERGÍA INCIDENTE	20
1.6 FRONTERAS DE APROXIMACIÓN AL ARCO ELÉCTRICO	20
1.7 SUPERVIVENCIA POR QUEMADURAS	22
1.8 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP).	24
1.8.1 capas de la vestimenta protectora y valor de resistencia total al arco del sistema	35
1.9 CONDICIONES DE TRABAJO ELÉCTRICAMENTE SEGURA.	35
CAPITULO 2	39
2.1 HISTORIA SOBRE LAS NORMAS RELACIONADAS AL ARCO ELÉCTRICO	39
2.1.1 Historia de la Nfpa 70e	40
2.1.2 Historia de la IEEE 1584	40
2.2 PROPOSITO DE LA NORMA NFPA 70 E	41
2.3 PROPOSITO DE LA GUÍA IEEE 1584	41
2.4 PROCESO DE ANÁLISIS DE RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO	42
2.4.1 recolección de información del sistema y de la instalación	42
2.4.2 los modos de funcionamiento del sistema	43
2.4.3 las corrientes de cortocircuito trifásico	43
2.4.4 las corrientes arco	43
2.4.5 las características del dispositivo de protección y la duración de los arcos:	43
2.4.6 las tensiones del sistema y la clase de equipo:	44
2.4.7 las distancias de trabajo:	44
2.4.8 Determinar la energía incidente para todos los equipos:	45
2.4.9 Determinar el límite de protección de arco eléctrico para todos los puntos de interés:	45
2.5 MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE DE LA IEEE 1584.	45
2.5.1 Rangos del modelo	45

2.5.2	Corriente de arco.....	46
2.5.3	Energía incidente.....	47
2.5.4	Método de Lee [11].....	48
2.6	LÍMITE DE PROTECCIÓN CONTRA EL RELÁMPAGO	49
2.7	MÉTODOS DE CÁLCULO DEL ARCO ELÉCTRICO	49
2.8	METODO PARA EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA FRONTERA DEL RELAMPAGO DE ARCO CON LA NFPA 70E-2015.	51
2.9	METODO PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SUPERIORES A 600 V CON LA NFPA 70E-2015.....	52
<i>CAPITULO 3</i>	<i>.....</i>	<i>54</i>
3.1	HERRAMIENTA NEPLAN ELECTRICITY	54
3.2	CASOS DE ESTUDIO	54
3.2.1	Ejemplo 1.....	54
3.2.2	ejemplo 2.....	58
<i>CAPITULO 4</i>	<i>.....</i>	<i>77</i>
4.1	RESULTADOS DEL EJEMPLO 2.....	77
4.2	CONCLUSIONES.....	80
4.3	IDEAS DE FUTUROS TRABAJOS.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Características según profundidad de quemadura y pronóstico [4].	15
Tabla 1.2. Clasificación de quemaduras por American Burn Association [1].	24
Tabla 1.3. Normas utilizadas para cada equipo de protección [5].	25
Tabla 1.4. Tareas que involucran riesgo eléctrico en una instalación eléctrica [5]. .	27
Tabla 1.5. Equipos con riesgo eléctrico y frontera de relámpago de arco [5].	31
Tabla 1.6. Categoría del equipo de protección personal (EPP) [5].	33
Tabla 2.1. Tiempos de funcionamiento del interruptor de potencia [11].	44
Tabla 2.2. Distancias de trabajo típicas [11].	44
Tabla 2.3. Distancia típica entre conductores y factor de distancia x.	48
Tabla 2.4. Métodos de cálculo y limitaciones.	51
Tabla 3.1. Información cortocircuito ejemplo 1.	56
Tabla 3.2. Información del tiempo de arco y cortocircuito de cada tablero.	56
Tabla 3.3. Corriente de cortocircuito en NEPLAN.	59
Tabla 3.4. Tiempos de disparo para una falla trifásica en cada relé.	62
Tabla 4.1. Resultados de la energía incidente ejemplo 2.	77
Tabla 4.2. Resultados categoría de protección personal ejemplo 2.	78
Tabla 4.3. Resultados distancia frontera de relámpago de arco ejemplo 2.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Capas de piel humana [4].	14
Figura 1.2. Fronteras de aproximación al arco eléctrico [5].	22
Figura 1.3. Fronteras de aproximación al posible arco eléctrico en un equipo [1]. ..	22
Figura 1.4. Regla del nueve para adultos y niños [10].	23
Figura 1.5. Porcentaje de supervivencia de las personas a quemaduras[1].	24
Figura 3.1. Diagrama unifilar sistema alimentado por 8 generadores de combustión a gas [12].	55
Figura 3.2. Diagrama unifilar sistema alimentado por línea de transmisión [12].	55
Figura 3.3. Diagrama unifilar ejemplo 2 y cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico simulado en NEPLAN.....	59
Figura 3.4. Curvas del relé WHESTINHOUSE CO-11	60
Figura 3.5. Tiempos de operación de los relés frente a una falla en el nodo 4.	61
Figura 3.6. Tiempos de los relés frente a una falla en el nodo 4 con selectividad....	62
Figura 3.7. Paso uno para cálculo de energía incidente NEPLAN.....	65
Figura 3.8. Paso dos para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.....	66
Figura 3.9. Paso tres para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.....	67
Figura 3.10. Paso cuatro para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	68
Figura 3.11. Paso cinco para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	69
Figura 3.12. Paso seis para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	70
Figura 3.13. Paso siete para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	71
Figura 3.14. Paso ocho para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.....	72
Figura 3.15. Resultado del caso 1.....	73

Figura 3.16. Consideración del número de nodos calculados.	74
Figura 3.17. Paso nueve para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	74
Figura 3.18. Paso diez para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.	75
Figura 3.19. Resultado energía incidente caso 1 NFPA 70E.	76
Figura 4.1. Resultado energía incidente entre métodos.	78
Figura 4.2. Resultado distancia frontera entre métodos.	79

RESUMEN

Entre los factores de riesgo más comunes en las instalaciones eléctricas se encuentra los arcos eléctricos, un fenómeno de mucho peligro que puede causar graves lesiones en las personas. De modo que es necesario estimar la energía incidente producida por un arco eléctrico en las zonas de interés.

En Colombia en el ámbito eléctrico para garantizar la protección de la vida de las personas, El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y el Reglamento de Salud Ocupacional del Sector Eléctrico (Res. 1348 del 30/04/09), exigen realizar un análisis de riesgos y entre los factores de riesgo más comunes se encuentra el arco eléctrico.

En el trabajo de grado se analizaron las variables, causas y efectos más significativos presentes en el arco eléctrico y en específico en la energía incidente en una instalación eléctrica, puesto que es de importancia para realizar trabajos en o cerca de partes energizadas, además se debe cumplir con distancias mínimas de seguridad, se debe tener señalización del nivel de arco en los puntos críticos de la instalación y se debe seleccionar adecuadamente los elementos de protección personal. Los métodos y procedimientos que se trabajaron son los descritos en las normas NFPA 70E-2015 (Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo) e IEEE 1584-2002 (Guía para el cálculo de los riesgos derivados del arco eléctrico).

En la actualidad existen estudios, métodos y programas que permiten calcular el efecto del arco, lo cual es de vital importancia para la seguridad eléctrica, por lo que se analizaron los métodos descritos en las normas mencionadas anteriormente para media tensión y se hizo la simulación con el programa de simulación NEPLAN.

INTRODUCCIÓN

El cálculo y la estimación de la energía incidente producida por el arco eléctrico en una instalación eléctrica, es determinante para definir procedimientos de trabajo más seguros, mitigar el peligro en las instalaciones eléctricas, conocer e informar sobre el nivel de riesgo y seleccionar adecuadamente los equipos de protección personal (por su siglas en ingles PPE).

Si se tiene el cálculo de la energía calórica incidente, se pueden definir las medidas de protección que se emplean en una instalación eléctrica, como son: utilizar materiales envolventes resistentes a los arcos eléctricos, mantener una distancia de seguridad y delimitar zonas de riesgo, usar prendas acordes con el riesgo de arco eléctrico según el nivel de tensión, gafas de protección contra rayos ultravioleta y protección auditiva contra la onda de presión.

Es necesario resaltar que reducir el riesgo en las instalaciones eléctricas a causa del arco eléctrico, puede prevenir o mitigar graves lesiones como quemaduras, daños auditivos, daños al sistema respiratorio e incluso pérdida de la vida. Por otra parte el arco eléctrico es un tema de actualidad, de modo que se invierten grandes recursos y adelantan estudios sobre arco eléctrico y equipos de protección personal (PPE) para la protección de las personas en instalaciones eléctricas, como se corrobora en la publicación “Arc Flash” Hazards, Incident Energy, PPE Ratings, and Thermal Burn Injury- A Deeper Look [1], donde varios miembros importantes de la IEEE y NFPA participan.

En este documento, en primer lugar se presenta el marco teórico sobre el arco eléctrico, la energía incidente y los equipos de protección personal, posteriormente se observara los métodos presentes en las normas NFPA 70E-2015 e IEEE 1584-2002. Luego se ilustran ejemplos detallados tanto teóricos como simulados mediante la herramienta NEPLAN y por último se muestran los resultados del cálculo de la energía incidente, de la distancia de protección y de la categoría de protección personal.

CAPITULO 1

ANALISIS DE LAS VARIABLES Y CONDICIONES QUE INCIDEN EN EL ARCO ELÉCTRICO EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN.

En este capítulo se describe el fenómeno de arco eléctrico, así como las posibles causas, efectos y generalidades de este en una instalación eléctrica de media tensión. Así mismo se estudian algunos aspectos sobre las fronteras de aproximación y los equipos de protección personal.

1.1 GENERALIDADES SOBRE EL ARCO ELÉCTRICO

Es un fenómeno que se presenta en las instalaciones eléctricas y debido a su peligrosidad para las personas y equipos eléctricos es de interés minimizar los posibles riesgos. El arco eléctrico es una condición peligrosa asociada con la liberación inesperada de una cantidad enorme de energía causada por una falla eléctrica [2]. Esta liberación se encuentra presente en forma de luz intensa, calor y ondas de presión, si el arco se presenta en un equipo puede esparcir componentes de material (cobre, acero o aluminio).

El arco eléctrico se define como un haz luminoso producido por el flujo de corriente eléctrica a través de un medio aislante, que produce radiación y gases calientes [3]. Físicamente, un arco se extiende entre dos electrodos (objetos metálicos) mantenidos a una diferencia de tensión suficiente, donde su geometría no es estándar y además su forma cambia con el tiempo [4].

1.2 PELIGROS SOBRE EL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico es capaz de producir daños irreversibles en las personas debido al impacto térmico, la radiación electromagnética y las enormes ondas de presión. Las personas pueden estar susceptibles por la enorme liberación de energía, deterioros en el sistema respiratorio debido a la inhalación de gases tóxicos producidos por las altas temperaturas alcanzadas por los materiales cercanos durante el fenómeno, daños auditivos por las ondas de presión generadas y quemaduras en la piel [3].

Una breve explosión de luz en un arco eléctrico puede causar ceguera temporal durante varios días, incluso si el arco es de duración muy corta, en ocasiones puede ocasionar pérdida visual permanente, así como cataratas. Debido a la radiación UV o infrarroja o la energía térmica [1]. El arco eléctrico puede ocasionar lesiones en

los pulmones por la inhalación de gases químicos y vapores metálicos, como el asma u otras enfermedades pulmonares.

La máxima onda de presión por lo general ocurre en medio ciclo iniciado el arco y pueden empujar a un trabajador contra una pared o un equipo al suelo. Las ondas de presión pueden dañar directamente los órganos del cuerpo, causando conmoción o trauma cerebral, colapso en los pulmones. En un accidente un trabajador puede parecer ileso pero puede tener pérdida de audición temporal o permanente, pérdida de memoria, dificultad para concentrarse y depresión incluso por varias semanas [1].

1.2.1 LESIÓN POR QUEMADURA

Las lesiones por quemaduras pueden ser fatales, afectar la salud, la independencia, las finanzas, la autoestima, la vida familiar y las relaciones sociales de una persona. Los efectos a largo plazo son: dolor crónico, picazón que puede provocar insomnio, destreza limitada del área quemada afectada, cambio en la apariencia física y disminución de la capacidad para participar en actividades recreativas y sociales.

Las quemaduras hacen que las proteínas dentro de las células se desnaturalicen y se coagulen, causando una forma de muerte celular conocida como necrosis coagulativa [1].

1.2.2 PIEL HUMANA

Para entender las lesiones y consecuencias que el arco eléctrico puede ocasionar a las personas cuando el fenómeno produce la liberación de energía y parte de esta en forma de calor hace contacto con la piel, es necesario comprender la anatomía de la piel humana. El cuerpo humano posee dos capas de piel, la epidermis y la dermis, así como el tejido subcutáneo (a veces denominado hipodermis y considerada una tercera capa de piel) [1].

La epidermis varía de 75 a 150 μm de espesor; dado que la epidermis está escasa de vasos sanguíneos, tejido linfático y tejido conectivo, obtiene todos los nutrientes de la dermis. La epidermis transita desde la capa superficial hasta la capa basal más interna, lo que ayuda a regular el calor del cuerpo. A diferencia de la epidermis la dermis varía de 1 a 4 mm de espesor y contiene tejido vascular, nervioso y linfático, compuesta de aproximadamente 10% a 30% de proteína fibrosa (principalmente colágeno), siendo el resto un complejo polisacárido (gel viscoelástico) [1].

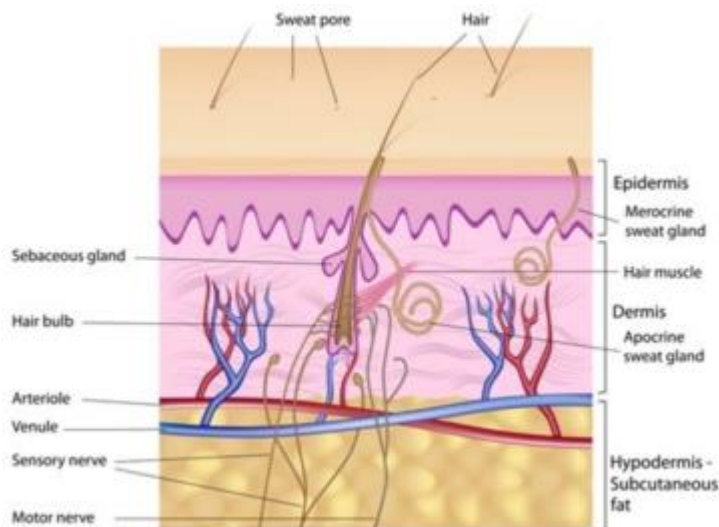


Figura 1.1. Capas de piel humana [4].

1.2.3 LESIÓN POR QUEMADURAS EN LA PIEL HUMANA Y CLASIFICACIÓN

En quemaduras menos graves el enrojecimiento visible se debe a la producción de mastocitos de histamina en la dermis. La circulación sanguínea en la piel, fuertemente influenciada por las respuestas del sistema nervioso al estrés local y sistémico, es una parte esencial de la regulación de la temperatura corporal. Los folículos pilosos, situados en la dermis aproximadamente 2 mm por debajo de la superficie de la piel, contienen células epiteliales que estimulan el crecimiento después de una lesión por quemadura. Si la profundidad de quemadura es mayor que la profundidad folicular, entonces el crecimiento es lento o imposible, debajo de la dermis el tejido subcutáneo consiste en grasa, seguida de músculo, está varía desde casi ninguna en la cara humana a 1,5 o 2 cm en el muslo. La grasa influye en la conductancia de la superficie de la piel y su grosor desempeña un papel importante en el mantenimiento de la temperatura corporal [1].

Cuando una lesión por quemadura produce una muerte celular significativa (necrosis coagulativa), la piel ya no puede seguir funcionando como una barrera semipermeable, lo que conlleva a una infección debida a las bacterias del entorno externo. Como una barrera a la penetración del agua, la piel también mantiene el ambiente interno, protegiendo el cuerpo de la pérdida de agua excesiva, por esta razón cuando existe una quemadura puede causar pérdida de agua e incluso puede resultar en disminución del volumen de sangre [1].

Las lesiones por quemaduras se clasifican por la profundidad de la necrosis, extensión de área afectada y localización, a continuación se muestra la clasificación según la profundidad. A menudo no es posible distinguir inicialmente entre la clasificación de las quemaduras en especial entre las de segundo (superficial o profundo) y las quemaduras de tercer grado. La estimación exacta de la profundidad de quemadura puede tomar desde tres días hasta tres semanas [1].

- Quemaduras de primer grado: a veces denominadas superficiales afectan sólo la epidermis, la capa superficial o superior de la piel.
- Quemaduras de segundo grado: afectan tanto a la epidermis como a la dermis y dependiendo de si la lesión se limita a la capa papilar superficial de la dermis o se extiende profundamente en la capa reticular de la dermis, se clasifican como superficial o de espesor parcial profundo.
- Quemaduras de tercer grado: a veces denominadas de espesor total conlleva la destrucción completa de la dermis y la epidermis incluyendo su red capilar.
- Quemaduras de cuarto grado: son las más graves y afectan el músculo y el hueso, también puede ocasionar la caída de la extremidad.

Un resumen de los tipos de quemaduras se proporciona en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características según profundidad de quemadura y pronóstico [4].

Clasificación según la profundidad de la necrosis	Características de la piel quemada y pronóstico.
Quemadura de primer grado (espesor parcial superficial)	Piel roja sin ampollas, doloroso y sensible con tratamiento sintomático, 7 días.
Quemadura de segundo grado (espesor parcial superficial)	Formación de ampollas húmedas y rojas, blanquear con la presión, 14 a 21 días cicatrización mínima.
Quemadura de segundo grado (espesor parcial profundo)	Posible formación de ampollas, de blanco pálido a amarillo, sensación de dolor ausente, no blanqueamiento con la presión, desbridamiento (eliminación del tejido muerto) e injerto de piel podría ser necesario, cicatrización en 3 a 8 semanas,

Clasificación según la profundidad de la necrosis	Características de la piel quemada y pronóstico.
Quemadura de tercer grado (espesor total)	Carbonizado, cuero pálido, indoloro, reparación quirúrgica y el injerto de piel necesario, cicatrices graves, meses.
Quemadura de cuarto grado	Terrible, potencialmente mortal, meses, cirugías múltiples usualmente requeridas (a menudo amputación o reconstrucción extensa), meses.

1.2.4 PELIGROS ELÉCTRICOS

La información a la fecha sobre accidentes de origen eléctrico en Colombia que tengan como consecuencia la muerte, lesiones graves de personas o afectación grave de inmuebles por incendio o explosión es restringida, debido que no se encuentra ningún reporte público sobre esta información, aunque las empresas responsables de la prestación del servicio público de energía eléctrica deben dar cumplimiento a lo establecido en el inciso d) del artículo 4 de la resolución 1348 de 2009 expedida por el Ministerio de la protección Social, deben investigar y reportar trimestralmente al Sistema Único de información de servicios públicos domiciliarios (SUI) cualquier accidente de origen eléctrico en las redes eléctricas e instalaciones [3].

Me puse en contacto con la (SUI) por medio de correo electrónico para obtener información precisa de cuantas personas son afectadas por origen de arco eléctrico. Pero no se pudo obtener esta información debido que la información reportada por las empresas de servicios públicos de energía eléctrica contiene campos de información personal.

Existen tres categorías generales de peligros eléctricos: choque eléctrico, relámpago de arco y ráfaga de arco.

- Choque eléctrico: cada año se presentan aproximadamente 30000 accidentes no fatales en Estados Unidos, También se estima que 1000 muertes son causadas por electrocución y más de la mitad de ellas mientras se trabajaba en sistemas energizados de menos de 600 V. La electrocución es la cuarta causa de muertes industriales después de accidentes de tránsito, homicidios y accidentes en construcción [5].

- Relámpago de arco: cuando la corriente eléctrica pasa a través de aire entre conductores no puestos a tierra o entre conductores no puestos a tierra y conductores puestos a tierra, la temperatura puede llegar casi a 19500 °C (35000 F). La exposición a estas temperaturas extremas quema la piel directamente y hace que la ropa se encienda, lo que incrementa las heridas por quemadura. La mayoría de las admisiones a hospitales debidas a accidentes eléctricos son por quemaduras de relámpago de arco eléctrico con más de 2000 personas cada año. Un dato importante es que los relámpagos de arco pueden y efectivamente matan a distancias de 3 m (10 pies) [5].
- Ráfaga de arco: Las elevadas temperaturas del arco causan la expansión explosiva tanto del aire circundante como del metal en la trayectoria del arco. Por ejemplo el cobre se expande 67000 veces cuando cambia de sólido a vapor. El peligro de esta expansión incluye altas presiones, sonido y proyectiles. Las altas presiones pueden exceder fácilmente miles de $lb/pies^2$ de presión, rompiendo tímpanos y destruyendo pulmones. Los sonidos asociados con esas presiones pueden exceder 160 dB. Finalmente, materiales y metal derretido son lanzados por el arco a velocidades que exceden de 1120 km/h suficientemente veloz para que las esquirlas penetren completamente el cuerpo humano [5].

1.3 POSIBLES CAUSAS DEL ARCO ELÉCTRICO

En las instalaciones eléctricas las fallas más comunes que originan un arco eléctrico pueden ser iniciadas o causadas por condiciones inadecuadas del lugar de trabajo y/o acciones incorrectas de los trabajadores cuando interactúan con sistemas energizados [6], a continuación se muestra las causas más comunes:

- Polvo, impurezas de corrosión, acumulación de óxido o partículas conductoras y falla en materiales aislantes.
- Contacto accidental con piezas en tensión o caída de herramientas, malos contactos, cortocircuitos.
- Sobretensiones transitorias a través de espacios estrechos.
- Diseño o uso inadecuado del equipo.

- Procedimientos de trabajo inadecuados, descuidos en los trabajos de mantenimiento, manipulación indebida de equipos de medida.
- Aperturas de interruptores con carga, apertura o cierre de seccionadores con carga, apertura de transformadores de corriente, apertura de transformadores de potencia con carga sin utilizar equipo extintor de arco, apertura de transformadores de corriente en secundarios con carga [3].

1.4 LIMITACIÓN Y PREVENCIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO

En la actualidad existen varias opciones para limitar los riesgos relacionados con el arco eléctrico. Algunos de los enfoques hacen hincapié en la prevención de arco, mientras que otros se centran en las tecnologías para mitigarlo. Aunque no existe una única práctica para tratar de mitigar el riesgo por arco eléctrico, los métodos de protección se clasifican en pasivos y en activos, de pre-ignición y de pos-ignición [7].

Entre los métodos pasivos y los de pre-ignición se encuentra la categoría de prevención de arco que por distintos medios reducen el riesgo: por medio de la educación de los trabajadores, para crear cultura de seguridad y conocimiento de las normas relativas al funcionamiento en un entorno con posible peligro por arco. Por medio del diseño, debido que existe ubicaciones en las que es más probable que las fallas de arco se produzcan en equipos eléctricos encerrados. Por medio del mantenimiento preventivo apropiado del equipo la probabilidad de fallas de arco se puede reducir, ya sea por la inspección visual, la imagen térmica, las pruebas de descarga parcial y las pruebas basadas en el tiempo de los dispositivos de protección [7].

La tecnología de predicción de arco eléctrico o protección proactiva es una categoría que está entre los métodos activos y los de pre-ignición que limita el riesgo por arco y se cuenta con distintos medios de reducción de riesgo como lo son: el medio de predicción de arco que posibilita analizar las condiciones previas al arco y encontrar signos tempranos de fallas en desarrollo, donde las conexiones flojas y la degradación del aislamiento son las causas más comunes de fallas de arco. El medio de detección de fallas en desarrollo mediante el análisis de corriente de fase, donde la corriente es generalmente medida y analizada para fines de protección, se aprovecha para medir la corriente de fase normal para encontrar fallos en desarrollo. El medio de detección basada en tensión de secuencia cero o diferencial de corriente, en el cual los cambios en la tensión de secuencia cero pueden dar una

indicación de un fallo a tierra en desarrollo en los sistemas de MT con neutro no puesto a tierra o compensado. El medio de detección de fenómenos que indican falla de arco donde además de las cantidades eléctricas comúnmente medidas, hay varias cantidades físicas que potencialmente pueden indicar un desarrollo del arco como son; Emisiones electromagnéticas, emisiones acústicas (ultrasónicas), emisiones ópticas, componentes de corriente de alta frecuencia, emisiones térmicas (emisión infrarroja e ionización térmica) y emisiones químicas [7].

Las tecnologías de sensores también pueden ser aplicadas para detectar los fenómenos antes del arco a continuación se mencionan algunas de estas: Antena de RF, Condensador de acoplamiento, transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT), Bobina de Rogowski, sensor piezoeléctrico ultrasónico, sensor de ultravioleta y sensores térmicos. La monitorización de la mayoría de estos métodos de indicación se debe trabajar en combinación con otros para tener un mejor diagnóstico [7].

Entre los métodos activos y los de pos-ignición se encuentra la categoría de protección reactiva, donde diferentes reacciones a fenómenos detectados después del encendido por arco reducen el tiempo o riesgo. Causas como la interacción humana directa o mal funcionamiento del equipo puede conducir a graves averías, donde las medidas preventivas o predictivas no son capaces de eliminar totalmente el riesgo de arco por esta razón se justifica la protección reactiva: por medio de la energía incidente de arco eléctrico se puede proporcionar medios para evaluar las distancias de trabajo seguras, necesarias y el equipo de protección personal (EPP) para los empleados. Por medio de la corriente de arco se puede realizar técnicas para la reducción de está mediante su estimación, durante el fenómeno de arco eléctrico, la longitud del arco varía, la resistencia del arco no es constante y la corriente de formación de máximo arco eléctrico tampoco es constante. El impacto de la reducción de la corriente de arco no debe analizarse sin examinar el impacto en el tiempo de operación de la protección, el tiempo de arco y la energía liberada [7].

Las categorías de equipos de protección personal y equipos de interrupción de arco que se encuentran entre los métodos pasivos y de pos-ignición los cuales no tienen ningún componente activo, es decir, no incluye mediciones, respuesta previa al arco (proactiva) y respuesta posterior (reactiva) [7].

1.5 GENERALIDADES SOBRE LA ENERGÍA INCIDENTE

La energía incidente es definida por la IEEE 1584 como la cantidad de energía que se imprime en una superficie, a una distancia de la fuente y que es generada durante un evento de arco eléctrico. La energía incidente se mide en julios por centímetro cuadrado (J/cm^2 o cal/cm^2).

La energía incidente es un concepto que tiene como objetivo principal proporcionar medios para evaluar las distancias de trabajo seguras, necesarias y el equipo de protección personal (EPP) para los trabajadores. No obstante, los cálculos de la energía incidente también se pueden usar para estimar el daño potencial al equipo, y cuando se comparan enfoques de protección diferentes [7]. Además se tiene que la energía requerida para producir una quemadura curable de segundo grado en la piel desprotegida se ha establecido como $5,0 J/cm^2$ (o $1,2 cal/cm^2$) [8].

La energía incidente de un arco eléctrico depende principalmente del voltaje, distancia, corriente y tiempo de arco. En la práctica, los factores clave son la corriente de arco y el tiempo de arco. Algunos enfoques de protección hacen hincapié en la limitación de la corriente, mientras que la mayoría de las soluciones apuntan a corto tiempo de formación de arco [7]. La energía incidente se puede entender no como la energía total incidente en la superficie expuesta, más bien, describe la "densidad de energía incidente" sobre un área superficial [1].

1.6 FRONTERAS DE APROXIMACIÓN AL ARCO ELÉCTRICO

Para mantener la seguridad eléctrica en una instalación se debe mantener una distancia apropiada a los conductores eléctricos y partes de circuitos energizados o expuestos donde se causan la mayoría de accidentes, si se disminuye la distancia aumenta el potencial de accidente eléctrico [5]. Por este motivo se crearon los siguientes límites, ver Figura 1.2 y Figura 1.3.

La distancia más alejada de los equipos o conductores energizados con posibilidad de arco indicaría la *frontera de relámpago de arco*, que determina la distancia de aproximación para personas no calificadas, este límite se considera debido que las personas no calificadas son menos capaces o capacitadas para reconocer los riesgos del choque y del destello que este fenómeno produce. Bajo ninguna circunstancia puede alguien, incluso una persona calificada, permitir que una persona no calificada cruce la frontera de relámpago de arco, a no ser que una

persona calificada asegure que las condiciones son seguras y se encuentre en permanente supervisión [5], [9].

La *frontera de aproximación límite* es la distancia más cercana que una persona no calificada puede estar ante un choque o destello del arco eléctrico. Las únicas personas a las que se les permite cruzar esta frontera son a las que se consideran calificadas, es decir, tienen un plan de aproximación aprobado, llevan el equipo de protección personal apropiado y saben cómo posicionar sus cuerpos de manera que se minimice el riesgo de contacto con conductores energizados. Una vez superado esta frontera, se considera que está a una distancia menor y se denomina *frontera de aproximación restringida*, esta es la distancia más cercana que una persona calificada puede acercarse [9].

Si una persona está en la *frontera de aproximación restringida* se considera lo mismo que una persona hace contacto directo con partes energizadas expuestas, por lo tanto debe seguir un plan de entrenamiento especializado y tiene que hacer lo siguiente:

- Tener un plan documentado y detallado que justifique la necesidad de trabajar dentro del área, aprobada por el administrador del sitio.
- Poseer entrenamiento específico para trabajar en conductores energizados o partes.
- Ha realizado un análisis de riesgo, aprobado por el administrador del sitio.
- Utilice un EPP apropiado para trabajar en las partes energizadas expuestas y clasificado para el voltaje y el nivel de energía presentes.

En anexos 1.1 se muestra las fronteras de aproximación a partes energizadas para la protección contra choques en corriente alterna para diferentes niveles de tensión.

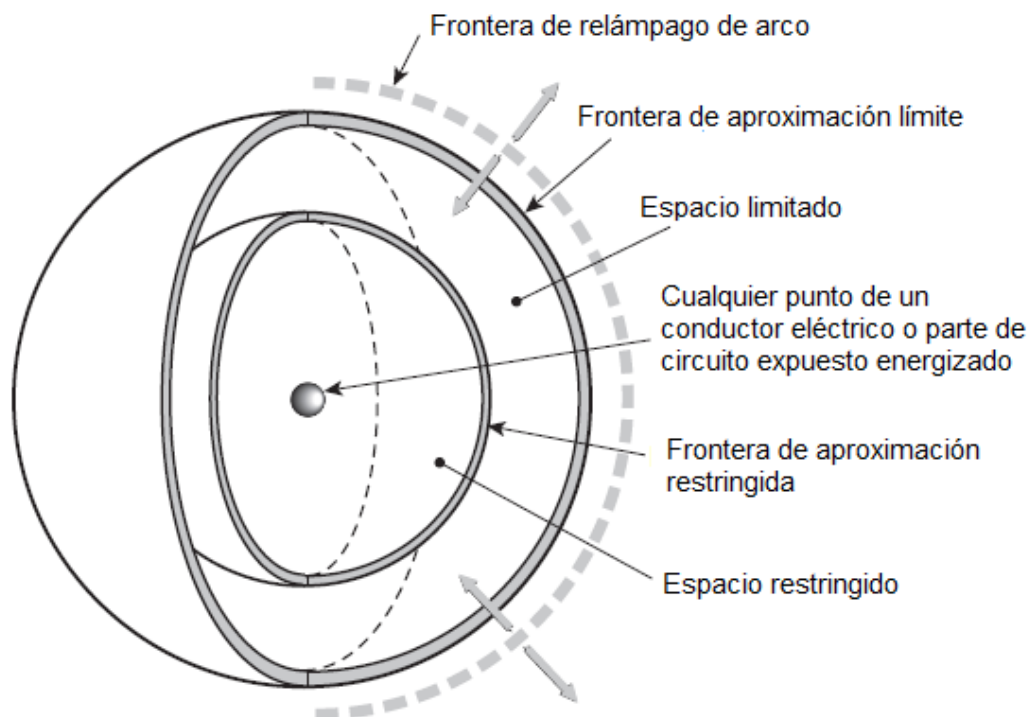


Figura 1.2. Fronteras de aproximación al arco eléctrico [5].

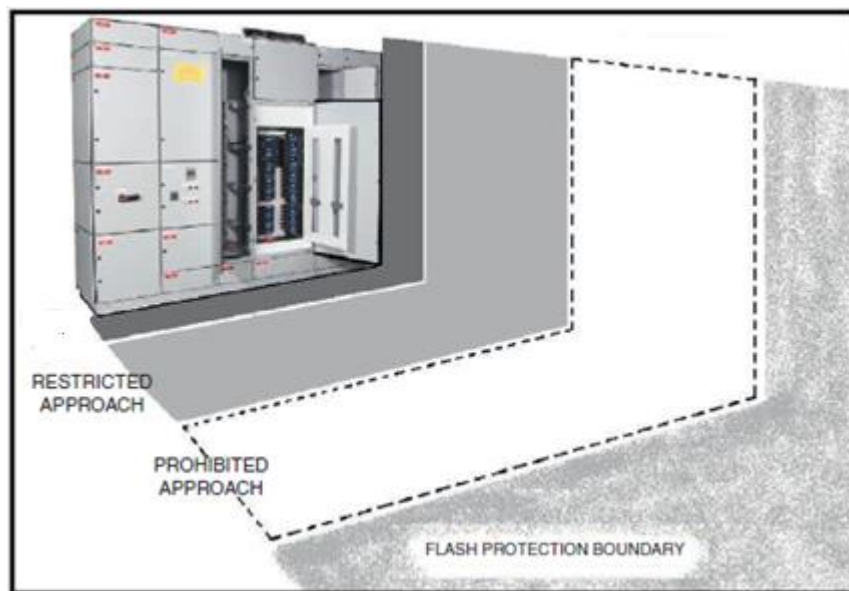


Figura 1.3. Fronteras de aproximación al posible arco eléctrico en un equipo [1].

1.7 SUPERVIVENCIA POR QUEMADURAS

Si una persona sobrevive a una quemadura grave depende de varios factores, particularmente la profundidad de la quemadura, la ubicación de la quemadura en

el cuerpo, la edad de la víctima y la extensión de la quemadura. Existen otros factores y condiciones de salud que son preexistentes, como enfermedad cardíaca, hepática o pulmonar, también efectos de quemaduras secundarias, tales como choque y edema pulmonar afectan la probabilidad de supervivencia. Por otro lado si una víctima sobrevive al período inicial de shock, la muerte puede ocurrir en las semanas posteriores debido a efectos secundarios en el cerebro, el corazón, los pulmones, el hígado y los riñones [1].

El tamaño de la quemadura se expresa como un porcentaje del área total de la superficie corporal (TBSA). En general la mortalidad aumenta con el aumento de TBSA y la medición de TBSA se estima comúnmente utilizando la 'Regla de los Nueves', donde el cuerpo se divide en regiones del 9% o un múltiplo de estas. Su utilidad radica en caso de emergencia estimar de forma rápida la cantidad de superficie corporal afectada por quemadura [10].

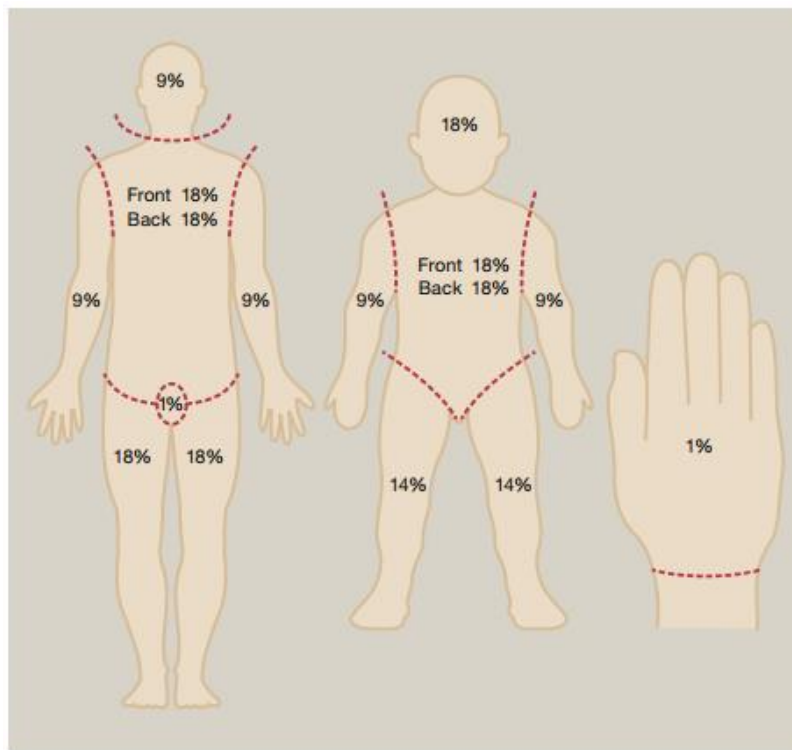


Figura 1.4. Regla del nueve para adultos y niños [10].

A continuación se presenta la información resumida de la clasificación y disposición de la quemadura según el rango de edad y el área total de superficie corporal (TBSA).

Tabla 1.2. Clasificación de quemaduras por American Burn Association [1].

Clasificación y disposición	Descripción para adultos basado en edad y área total superficial del cuerpo (TBSA)
Quemadura grave Centro de tratamiento de quemaduras	Segundo grado mayor del 25% TBSA o 20% mayores de 50 Tercer grado mayor del 10% quemaduras con manos, cara, pies, perineo, articulaciones principales; quemaduras eléctricas
Quemadura moderada Hospitalización	Segundo grado mayor del 15 al 25% TBSA o 10 al 20% mayores de 50 Tercer grado menor o igual al 10% TBSA
Quemadura menor Ambulatorio	Segundo grado menor del 15% TBSA o menor 10% mayores de 50 Tercer grado menor al 2% TBSA

La Figura 1.5 es un gráfico de barras que muestra la probabilidad de supervivencia de una persona en función de la edad y el porcentaje del cuerpo quemado.

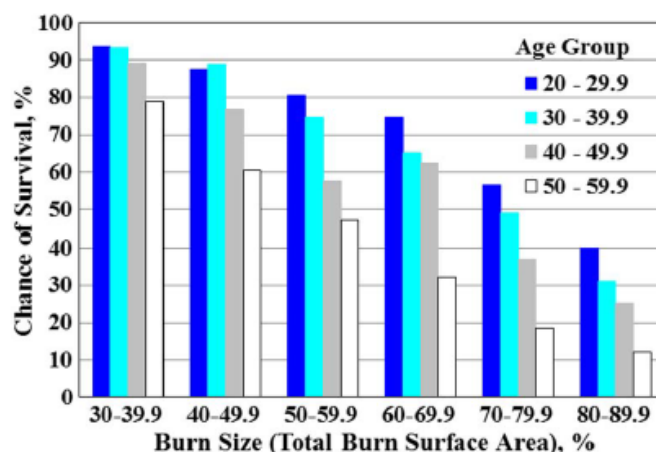


Figura 1.5. Porcentaje de supervivencia de las personas a quemaduras[1].

1.8 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP).

A todas las personas que trabajan en áreas donde existen peligros eléctricos se les debe proveer y ellos deben usar equipos de protección diseñados y elaborados para la parte específica del cuerpo que va a proteger y para el trabajo que va realizar. Los equipos de protección personal tienen el fin de proteger a la persona de los peligros de arco eléctrico, aunque en algunas situaciones podrían resultar en quemaduras de piel, aun con la protección seleccionada, las lesiones por quemadura deberían reducirse y hacer posible la supervivencia. Por otro lado los

EPP no están diseñados para la protección contra traumatismos físicos que no sean por exposición a los efectos térmicos de un relámpago de arco [5].

El equipo de protección personal debe permitir el movimiento y visibilidad, las diferentes partes que debe proteger son: área de la cabeza la cual no debe ser conductiva, protección de los ojos, protección auditiva, protección del cuerpo, protección de manos y brazos, protección de los pies. Las características del material de la ropa deben ser tal que no se fundan a temperaturas por debajo de 315°C (600°F), es decir no se deberá usar prendas hechas o compuestas de acetato, acrílico, nilón, poliéster, polietileno, polipropileno y spandex u otras prendas. Además deberán tener un cuidado y mantenimiento adecuado, se inspeccionara el EPP antes de cada uso y si se encuentra deteriorados no se usaran. También se deberán seguir la instrucciones del fabricante y se deberá almacenar las prendas de manera que prevengan los daños por humedad, polvo u otros agentes deteriorantes. En caso tal que se necesite reparación se debe usar los mismos materiales del EPP [5].

A continuación se presenta algunas de las normas para cada equipo de protección de acuerdo a la NFPA 70E.

Tabla 1.3. Normas utilizadas para cada equipo de protección [5].

Objeto	Título del documento	Nro. De documento
Indumentaria resistente al arco	Estándar de especificación para desempeño de materiales textiles utilizados en la vestimenta para uso de trabajadores electricistas expuestos a riesgos de arco eléctrico momentáneo y a los riesgos relacionados	ASTM F1506
	Guía normalizada para el cuidado y mantenimiento de la ropa resistente al fuego, energía térmica y descarga de arco	ASTM F1449
	Guía normalizada para el cuidado, mantenimiento y lavado domestico de la ropa resistente al fuego, energía térmica y descarga de arco	ASTM F2757
Delantales aislantes	Estándar de especificación para delantales eléctricamente aislantes	ASTM F2677
Protección de los ojos y cara	Practica para la protección ocupacional y educacional de los ojos y la cara	ASTM Z87.1

Objeto	Título del documento	Nro. De documento
Protección facial	Estándar de prueba para determinar el valor de resistencia al arco y especificación normalizada para productos de protección facial	ASTM F2178
Protección contra caídas	Estándar de especificación para equipos contra caídas	ASTM F887
Calzado	Estándar de especificación para calzado dieléctrico	ASTM F1117
Calzado	Estándar de prueba para determinar la resistencia dieléctrica del calzado	ASTM F1116
Calzado	Estándar de especificación de requerimientos de desempeño para el calzado de protección (seguridad) con puntera	ASTM F2413
Calzado	Estándar de métodos de prueba para protecciones de los pies	ASTM F2412
Guantes-Cuero	Estándar de especificaciones para protectores de cuero para mitones y guantes de goma aislante	ASTM F696
Guantes-Hule	Estándar de especificación para guantes de goma aislantes	ASTM D120
Guantes y mangas- Cuidado en servicio	Estándar de especificación para el cuidado en servicio de guantes y mangas aislantes	ASTM F496
Protección de la cabeza-Cascos	Estándar para la protección de la cabeza para trabajadores industriales	ANSI Z89.1
Prendas impermeables resistentes al arco	Estándar de especificación para prendas impermeables resistentes a llamas y arcos	ASTM F1891
Productos protectores de hule	Estándar para la inspección visual de productos de goma para protección eléctrica	ASTM F1236
Mangas	Estándar de especificación para mangas de hule aislantes	ASTM D1051

La identificación de peligros es uno de los componentes de riesgo y esté a su vez involucra la determinación de la probabilidad de ocurrencia de un incidente. La Tabla 1.4 muestra las diferentes tareas que se pueden realizar en una instalación eléctrica y que involucran riesgo eléctrico, así como la condición del equipo y la inclusión o

no del EPP debido a la probabilidad que el relámpago de arco ocurra, cabe aclarar que esta tabla no cubre todas las posibles condiciones o situaciones [5].

Tabla 1.4. Tareas que involucran riesgo eléctrico en una instalación eléctrica [5].

Tarea	Condición del equipo	EPP requerido
Lectura de un medidor del panel mientras se opera un interruptor de medición	Cualquiera	No
Operación normal de interruptores de circuitos, interruptores, contactores o arrancadores	Se deben cumplir todas las siguientes: -El equipo está instalado y mantenido apropiadamente -Todas las puertas del equipo están cerradas y aseguradas -Todas las cubiertas del equipo están en su lugar y aseguradas -No existe evidencia de falla inminente	No
	Se deben cumplir una o más de las siguientes: -El equipo no está instalado o mantenido apropiadamente -Las puertas del equipo están abiertas o no aseguradas -Las cubiertas del equipo están retiradas o no aseguradas -Existe evidencia de falla inminente	SI
Trabajo en conductores y partes de circuitos eléctricos energizados, incluyendo pruebas de tensión (sistemas c.a)	Cualquiera	SI
Pruebas de tensión en celdas de batería, individuales o unidades de celdas múltiples	Se deben cumplir todas las siguientes: -El equipo está instalado y mantenido apropiadamente -Todas las cubiertas del equipo están en su lugar y aseguradas -No existe evidencia de falla inminente	No
	Se deben cumplir una o más de las siguientes: -El equipo no está instalado o mantenido apropiadamente -Las puertas del equipo están abiertas o no aseguradas	SI

Tarea	Condición del equipo	EPP requerido
	-Las cubiertas del equipo están retiradas o no aseguradas -Existe evidencia de falla inminente	
Retiro o instalación de interruptores de circuitos o interruptores	Cualquiera	Si
Retiro o instalación de cubierta para equipos tales como canalizaciones de cables, cajas de empalme y bandejas portacables que no exponen conductores o partes de circuitos eléctricos energizados desnudos	Se deben cumplir todas las siguientes: -El equipo está instalado y mantenido apropiadamente -No existe evidencia de falla inminente	No
	Se deben cumplir una o más de las siguientes: -El equipo no está instalado o mantenido apropiadamente -Existe evidencia de falla inminente	Si
Retiro de tapas atornilladas (para exponer conductores y partes de circuitos eléctricos energizados desnudos)	Cualquiera	Si
Retiro de cubiertas de contactos entre celdas de baterías	Se deben cumplir todas las siguientes: -El equipo está instalado y mantenido apropiadamente -Las cubiertas de todos los otros equipos están en su lugar y aseguradas -No existe evidencia de falla inminente	No
	Se deben cumplir una o más de las siguientes: -El equipo no está instalado o mantenido apropiadamente -Las puertas del equipo están abiertas o no aseguradas -Las cubiertas del equipo están retiradas o no aseguradas -Existe evidencia de falla inminente	Si
Apertura de puerta o cubierta con bisagras (para exponer conductores y partes de circuitos eléctricos energizados desnudos)	Cualquiera	Si

Tarea	Condición del equipo	EPP requerido
Efectuar termografía infrarroja y otras inspecciones sin contacto, fuera de la frontera de aproximación restringida	Cualquiera	No
Aplicación de los equipos protectores de puesta a tierra temporal, luego de la prueba de tensión	Cualquiera	Si
Trabajo en circuitos de control con conductores eléctricos y partes de circuitos energizados expuestos a expuestos a 120 volts o menos sin otros equipos expuestos a más de 120 volts	Cualquiera	No
Trabajos en circuitos de control con conductores eléctricos y partes de circuitos energizados expuestos mayores a 120 volts	Cualquiera	Si
Inserción o retiro de "cubículos" individuales de arrancadores de centros de control de motores (MCC)	Cualquiera	Si
Inserción o extracción de los interruptores de circuitos o arrancadores de los cubículos, puertas abiertas o cerradas	Cualquiera	Si
Inserción o extracción de enchufe en o desde conductos para barras colectoras	Cualquiera	Si
Examinación de cables aislados sin manipulación de cables	Cualquiera	No
Examinación de cables aislados con manipulación de cables	Cualquiera	Si

Tarea	Condición del equipo	EPP requerido
Trabajo en conductores eléctricos y partes de circuitos energizados expuestos de equipos directamente alimentados por un panel de distribución o centro de control de motores	Cualquiera	Si
Inserción o extracción de medidores de facturación	Cualquiera	Si
Tablero de potencia resistente a arcos, Tipo 1 o 2(para tiempos de despeje <0.5 s con una corriente de falla prospectiva que no exceda el valor de resistencia a arcos de los equipos) y tablero de potencia del interruptor con envolvente de metal, con o sin fusibles de una construcción de tipo resistente al arco, probada en concordancia con IEEE C37.20.7	Se deben cumplir todas las siguientes: -El equipo está instalado y mantenido apropiadamente -Todas las puertas del equipo están cerradas y aseguradas -Todas las cubiertas del equipo están en su lugar y aseguradas -No existe evidencia de falla inminente	No
-Inserción o extracción de los interruptores de circuitos de los cubículos -Inserción o extracción de dispositivos de prueba y puesta a tierra -Inserción o extracción de transformadores de tensión en o fuera de la barra.	Se deben cumplir una o más de las siguientes: -El equipo no está instalado o mantenido apropiadamente -Las puertas del equipo están abiertas o no aseguradas -Las cubiertas del equipo están retiradas o no aseguradas -Existe evidencia de falla inminente	Si
Apertura de los compartimientos de transformadores de tensión o transformadores de control de potencia	Cualquiera	Si
Operación del interruptor de desconexión en un	Cualquiera	Si

Tarea	Condición del equipo	EPP requerido
espacio a la intemperie (accionado por pértiga) a 1 kV y hasta 15 kV		
Operación del interruptor de desconexión a la intemperie (de accionamiento conjunto, desde el nivel del terreno) a 1 kV y hasta 15 kV	Cualquiera	Si

La Tabla 1.5 muestra los diferentes equipos con los que se trabaja en una instalación eléctrica y que involucran riesgo eléctrico, así como la categoría del EPP para el evento de arco y la frontera de relámpago de arco.

Tabla 1.5. Equipos con riesgo eléctrico y frontera de relámpago de arco [5].

Equipo	Categoría de EPP para relámpago de arco	Frontera de relámpago de arco
-Paneles de distribución u otros equipos con tensión nominal de 240 V y menor -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 25 kA; máximo 0.03 s (2 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	1	485 mm
-Paneles de distribución y otros equipos con tensión nominal >240 V y hasta 600 V -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 25 kA; máximo 0.03 s (2 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	2	900 mm
-Centros de control de motores (CCM) de clase 600 V -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 65 kA; máximo 0.03 s (2 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	2	1.5 m

Equipo	Categoría de EPP para relámpago de arco	Frontera de relámpago de arco
-Centros de control de motores (CCM) de clase 600 V -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 42 kA; máximo 0.33 s (20 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	4	4.3 m
-Tablero de potencia de clase 600 V (con interruptores de circuitos de potencia o interruptores con fusibles) y tablero de distribución de 600 V -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 35 kA; máximo 0.5 s (30 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	4	6 m
-Otros equipos de clase 600 V (277V a 600 V, nominales) -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 65 kA; máximo 0.03 s (2 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 455 mm (18 pulg.)	2	1.5 m
-Arrancadores de motores NEMA E” (contactor con fusible), 2.3 kV a 7.2 kV -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 35 kA; máximo 0.24 s (15 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 910 mm (36 pulg.)	4	12 m
-Tablero de potencia blindado, 1 kV a 15 kV -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 35 kA; máximo 0.24 s (15 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 910 mm (36 pulg.)	4	12 m

Equipo	Categoría de EPP para relámpago de arco	Frontera de relámpago de arco
-Tablero de potencia resistente a arcos, Tipo 1 o 2 para tiempos de despeje <0,5 s (30 ciclos) con una corriente de falla prospectiva que no exceda el valor de resistencia a arcos de los equipos y tablero de potencia del interruptor con envolvente de metal, con o sin fusibles de una construcción de tipo resistente al arco probada en concordancia con IEEE C37.20.7, 1kV hasta 15 kV -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 35 KA; máximo 0.24 s (15 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 910 mm (36 pulg.)	N/A (puertas cerradas)	N/A(puertas cerradas)
	4 (puertas abiertas)	12 m
-Otros equipos de 1 KV a 15 KV -Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible de 35 KA; máximo 0.24 s (15 ciclos) de tiempo de despeje de fallas; distancia de trabajo mínima 910 mm (36 pulg.)	4	12 m

El equipo de protección personal para relámpago de arco no debe ser inferior a la categoría 1, así lo equipos sean de tensión nominal de 600 volts o menor y los limitadores de corriente trabajen a 200 amperes o menos. En la Tabla 1.6 se muestra la categoría de EPP.

Tabla 1.6. Categoría del equipo de protección personal (EPP) [5].

Categoría de EPP	EPP resistente al arco
1	-Vestimenta resistente al arco, con valor mínimo de resistencia al arco de 4 cal/cm² -Camisa de mangas largas y pantalones u overol (mameluco) resistentes al arco -Protector facial resistente al arco o capucha del traje de protección contra relámpago de arco -Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN) -Equipos de protección: casco, anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), protección auditiva (tapones), guantes de cuero uso industrial y calzado de trabajo de cuero (SSN).

Categoría de EPP	EPP resistente al arco
2	-Vestimenta resistente al arco, con valor mínimo de resistencia al arco de 8 cal/cm² -Camisa de mangas largas y pantalones u overol (mameluco) resistentes al arco -Capucha del traje o protector facial y pasamontañas de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco -Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN) -Equipos de protección: casco, anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), protección auditiva (tapones), guantes de cuero uso industrial y calzado de trabajo de cuero.
3	-Vestimenta resistente al arco, seleccionada de manera que el valor de resistencia al arco del sistema cumpla con el valor mínimo de resistencia al arco requerido de 25 cal/cm² -Camisa de mangas largas, pantalones y overol (mameluco) resistentes al arco (SSR). -Chaqueta (SSR), pantalón (SSR) y capucha de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco -Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN) -Equipos de protección: casco, anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), protección auditiva (tapones), guantes de cuero uso industrial y calzado de trabajo de cuero.
4	-Vestimenta resistente al arco, seleccionada de manera que el valor de resistencia al arco del sistema cumpla con el valor mínimo de resistencia al arco requerido de 40 cal/cm² -Camisa de mangas largas, pantalones y overol (mameluco) resistentes al arco (SSR) -Chaqueta (SSR), pantalón (SSR) y capucha de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco -Chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN) -Equipos de protección: casco, anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), protección auditiva (tapones), guantes de cuero uso industrial y calzado de trabajo de cuero.

El significado de las abreviaturas de la Tabla 1.6 son: SSN según sea necesario, SSR según sea requerido, SR selección requerida. Se debe tener en cuenta que las protecciones faciales deben tener una protección envolvente con el fin de proteger no solo la cara sino también las orejas, cuello y demás partes cercanas. Por otro lado si se usan guantes de hule aislantes con protectores de cuero no es necesario guantes adicionales de cuero ya que esta combinación satisface el requisito de protección contra relámpago de arco [5].

1.8.1 CAPAS DE LA VESTIMENTA PROTECTORA Y VALOR DE RESISTENCIA TOTAL AL ARCO DEL SISTEMA

La disposición en capas de la vestimenta resistente al arco es un enfoque efectivo para lograr el valor de resistencia al arco requerido. El uso de todas las capas de vestimenta resistente al arco permitirá alcanzar el valor de resistencia de arco requerido con el menor número de capas y el menor peso del sistema de vestimenta. Para aumentar el valor de resistencia al arco de una prenda o de un sistema de vestimenta no deberían usarse prendas de vestir que no sean resistentes al arco [5].

El valor de resistencia al arco de todo el sistema es el que se obtiene cuando todas las capas de vestimenta usadas por el trabajador se someten a prueba, por ejemplo, un sistema de vestimenta es un overol (mameluco) resistente al arco que se usa sobre una camisa resistente al arco y pantalones resistentes al arco, en el que todas las prendas están fabricadas con la misma tela. Para este sistema de dos capas de vestimenta resistente al arco, el valor de resistencia puede ser de más de tres veces mayor que los valores de las capas individuales, es decir que si los valores de resistencia de arco del overol, camisa y pantalones están en el rango de 5 Cal/cm^2 a 6 Cal/cm^2 , el valor de resistencia al arco total de las dos capas sería de más de 20 Cal/cm^2 [5].

1.9 CONDICIONES DE TRABAJO ELÉCTRICAMENTE SEGURA.

Para tener prácticas y procedimientos que brinden al personal seguridad al riesgo eléctrico en instalaciones eléctricas es necesario verificar el siguiente proceso [5]:

- 1) Determinar todas las posibles fuentes de suministro de energía eléctrica al equipo específico. Para esto se revisan planos, diagramas y etiquetas de identificación los cuales sean aplicables y se encuentren actualizados.

- 2) Interrumpir la corriente de carga apropiadamente, abrir el(los) dispositivo(s) de desconexión para cada fuente.
- 3) Cuando sea posible, se debe verificar visualmente que todas las cuchillas de los dispositivos de desconexión estén completamente abiertas o que los interruptores automáticos extraíbles se encuentren en la posición de desconexión total.
- 4) Instalar los dispositivos de bloqueo y etiquetando según lo disponga la política establecida y documentada.
- 5) Utilizar un equipo de prueba con el adecuado valor nominal (ver ANSI/ISA 61010-1) para probar cada conductor de fase o cada parte del circuito comprobando que se encuentra desenergizado. Probar cada conductor de fase o parte de circuito de fase a fase y de fase a tierra. Antes y después de cada prueba. Verificar que el instrumento de prueba esté operando satisfactoriamente mediante su verificación en una fuente de tensión conocida.
- 6) Donde exista la posibilidad de tensiones inducidas o energía eléctrica almacenada. Poner a tierra los conductores de fase o partes de circuito antes de tocarlos. Donde razonablemente se pueda anticipar que los conductores o partes de circuitos que se encuentran desenergizados pueden hacer contacto con otros conductores o partes de circuitos energizados, instalar dispositivos de desconexión a tierra con capacidad adecuada para la corriente disponible de cortocircuito.

Además de cumplir con los anteriores requerimientos se debe conocer e implementar el programa de seguridad eléctrica que se dividen en tres ítems, pero no se limitan solo a estos:

- Principios característicos de un programa de seguridad eléctrica.
 - 1) Inspeccionar y evaluar los equipos eléctricos.
 - 2) Mantener la integridad del aislamiento de los equipos eléctricos y de la envolvente.
 - 3) Planificar cada uno de los trabajos y documentar los procedimientos que se realizan por primera vez

- 4) Desenergizar si es posible
- 5) Anticipar eventos no esperados
- 6) Identificar los peligros eléctricos y reducir los riesgos asociados
- 7) Proteger a los empleados contra: choque, quemadura, ráfaga y otros peligros causados por el medio ambiente de trabajo
- 8) Usar las herramientas correctas para el trabajo
- 9) Evaluar las habilidades de las personas
- 10) Auditar estos principios

- Controles característicos del programa de seguridad eléctrica

- 1) El empleador desarrolla los programas, incluido el entrenamiento y el empleado los aplica.
- 2) Los empleados son entrenados a fin de calificarlos para el trabajo en un entorno influenciado por la presencia de energía eléctrica.
- 3) Los procedimientos son para usarse como herramientas para identificar los riesgos eléctricos y para desarrollar planes para la eliminación de los riesgos o para controlar el riesgo asociado para esos peligros que no pueden ser eliminados.
- 4) Todos los conductores o partes de circuitos eléctricos se consideran energizados hasta que se demuestre lo contrario
- 5) Desenergizar un conductor eléctrico o pieza de circuito y volverlos seguros para trabajar sobre ellos es, en sí misma una tarea potencialmente peligrosa.
- 6) Las tareas que se van a llevar a cabo en o cerca de conductores eléctricos y partes de circuitos energizados expuestos tienen que ser identificadas y categorizadas.
- 7) Se determinan y emplean precauciones apropiadas para el entorno de trabajo
- 8) Se aplica un enfoque lógico para determinar el riesgo potencial asociado a cada tarea.

- Procedimientos característicos de un programa de seguridad eléctrica.

- 1) Propósito de la tarea
- 2) Clasificación y número de empleados que van a participar
- 3) Identificación de peligros y evaluación de riesgos de la tarea
- 4) Límites de aproximación
- 5) Prácticas seguras de trabajo que se van a utilizar

- 6) Equipo de protección personal (EPP) que se requiere.
- 7) Material y herramientas aislantes que se requieren.
- 8) Técnicas especiales de precaución.
- 9) Diagramas eléctricos unifilares
- 10) Detalles de equipos
- 11) Esquemas o fotografías de características exclusivas.
- 12) Datos de referencia.

CAPITULO 2

MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA INCIDENTE DE UN ARCO ELÉCTRICO EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN.

En este capítulo se presenta las metodologías de las normas NFPA 70E e IEEE 1584 para determinar la energía incidente debido al fenómeno de arco eléctrico, así mismo se presenta una breve historia de las normativas.

2.1 HISTORIA SOBRE LAS NORMAS RELACIONADAS AL ARCO ELÉCTRICO

El desarrollo de regulaciones y estándares sobre el fenómeno de arco eléctrico se puede decir que es reciente, debido que solo hasta hace poco se ha logrado comprender mejor esté. Además, se ha reconocido su peligro gracias a investigaciones y pruebas que se han realizado en las últimas décadas.

El 29 de diciembre de 1970, se promulgó la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo en Estados Unidos, donde se exige que cada empleador deberá proporcionar un lugar de trabajo que este libre de riesgos o puedan causar la muerte o daños físicos graves a sus empleados. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) tiene la responsabilidad de garantizar la seguridad de los trabajadores, dando así inició al desarrollo de reglamentaciones, incluidas aquellas que se enfocaron en identificar los peligros eléctricos e implementar prácticas de trabajo seguras [8].

OSHA usó inicialmente el Código Eléctrico Nacional (NEC) como base para las regulaciones eléctricas, pero como el NEC no abarcaba detalladamente sobre la seguridad eléctrica de los empleados. El 7 de enero de 1976, se formó el comité de desarrollo de normas eléctricas la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (National fire protection association NFPA), la cual debe ayudar a OSHA a preparar estándares que abordan específicamente la seguridad eléctrica [8].

En el 2002 el NEC comenzó a exigir el uso de etiquetas que advierten a los trabajadores sobre posibles riesgos de arco eléctrico. Este mismo año, un grupo de trabajo de IEEE completó la publicación del estándar IEEE 1584-2002: Guía para realizar cálculos de riesgo de arco eléctrico, donde presenta modelos para estimar los niveles de energía incidente basados en una gran cantidad de datos de prueba [8]. Estas normas y guías mencionadas anteriormente se adaptaron no con el mismo detalle en el RETIE, donde en el artículo 9.3 (Factores de riesgo eléctrico más

común) incluyen el fenómeno del arco eléctrico como peligro implícito en las instalaciones eléctricas.

Aunque se ha avanzado mucho en el estudio del arco eléctrico, todavía se invierte una gran cantidad de recursos en esté. Debido que las exposiciones reales de arco eléctrico son muy difíciles de predecir debido a su naturaleza compleja, aleatoria y la gran cantidad de variables involucradas [1], [8].

2.1.1 HISTORIA DE LA NFPA 70E

La primera edición de la NFPA 70E se publicó en 1979, en esta se cubría los requisitos de seguridad de la instalación. Luego tres ediciones posteriores durante la próxima década agregaron secciones sobre prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad y requisitos de mantenimiento relacionados con la seguridad. Consecutivamente en 1991 OSHA añadió palabras reconociendo el arco eléctrico como un peligro eléctrico. Pero no fue sino hasta la quinta edición de la NFPA 70E, publicada en 1995 que se creó la primera norma que aborda específicamente el riesgo de arco eléctrico. En esta se incluyó requisitos para la ropa de protección y se definió un límite de protección de arco [5], [8].

Las siguientes dos revisiones se centraron en el análisis detallado del riesgo de arco eléctrico, proporcionando más especificaciones con respecto a los límites de protección de arco eléctrico y los cálculos de energía incidente. También incluye cálculos de muestra de los límites de protección de arco en el Anexo D con fines informativos [8].

2.1.2 HISTORIA DE LA IEEE 1584

Lee en 1982, se publicó "El otro peligro eléctrico: quemaduras por arco eléctrico" Este artículo es considerado por muchos como una de las contribuciones de investigación más importantes sobre los fenómenos de arco al aire libre. Fue significativo porque proporciono una idea y cuantifico las quemaduras por arco eléctrico. Estos hallazgos comenzaron a llenar un vacío creado por los primeros trabajos que identificaron la descarga eléctrica como el principal peligro eléctrico. También ayudó a establecer una relación entre el tiempo transcurrido hasta la muerte y la temperatura de las células de tejido humano, así como una relación curable entre la piel, el tiempo y la temperatura [5], [8], [11].

Las fórmulas de Ralph Lee para calcular la relación distancia-energía de la fuente de arco no servían para el efecto térmico cuando el arco inicia en recintos de equipos eléctricos. Posteriormente en un artículo de Doughty, Neal y Floyd,

"Predicción de energía incidente para gestionar mejor el riesgo de arco eléctrico en sistemas de distribución de energía de 600 v" presentó los hallazgos de muchas pruebas estructuradas utilizando tanto "arcos al aire libre" como "arcos en una caja cúbica" [11].

Debido a la contribución de muchas organizaciones y personas la primera edición de la IEEE para realizar cálculos de riesgo de arco eléctrico (Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations) se publicó el 23 septiembre del 2002 (vigente). Esta norma utiliza datos de prueba extensos para desarrollar ecuaciones empíricas derivadas del análisis estadístico [11].

2.2 PROPOSITO DE LA NORMA NFPA 70 E

EL propósito de la norma es garantizar de forma práctica un área de trabajo segura a los trabajadores en relación con los riesgos que derivan del uso de la electricidad. De manera que salvaguarden los empleados en actividades como instalación, inspección, operación, mantenimiento y demolición (desmantelamiento) de conductores eléctricos, equipos eléctricos, canalizaciones de comunicación y señalización [5].

La norma se encuentra dividida en una introducción y tres capítulos que son: prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad, requisitos de seguridad relacionados al mantenimiento y requisitos de seguridad para equipos especiales. Además cuenta con dieciséis anexos informativos los cuales cuenta con información de gran importancia como por ejemplo en el anexo D "métodos de cálculo de energía incidente y frontera de relámpago de arco". Su versión actual es la 2015, pero también se cuenta con un adelanto de la versión 2018.

2.3 PROPOSITO DE LA GUÍA IEEE 1584

En esta guía se presenta métodos para el cálculo de la energía incidente del arco eléctrico y los límites de arco eléctrico en sistemas de CA trifásicos a los que los trabajadores pueden estar expuestos. Cubre el proceso de análisis desde la recolección de datos de campo hasta los resultados finales, presenta las ecuaciones necesarias para encontrar la energía incidente y el límite de protección de arco, y analiza las alternativas de solución de software. Además proporciona técnicas para que los diseñadores y operadores de instalaciones apliquen en la determinación de

la distancia de riesgo de arco eléctrico y la energía incidente a la que los empleados podrían estar expuestos durante su trabajo en o cerca de equipos eléctricos [11].

2.4 PROCESO DE ANÁLISIS DE RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO

Un análisis de riesgo de arco eléctrico debe realizarse en conjunto con el estudio de cortocircuito (IEEE Std 141-1993) y el estudio de coordinación del dispositivo de protección (IEEE Std 242-2001). Los resultados del estudio de cortocircuito se usan para determinar la corriente de falla instantánea, capacidad de interrupción y la capacidad de cortocircuito de los equipos eléctricos. Los resultados del estudio de coordinación del dispositivo de protección se usan para determinar el tiempo requerido por los dispositivos de protección, para aislar condiciones de sobrecarga o cortocircuito. Los resultados del análisis de riesgo por arco eléctrico se utilizan para identificar el límite de protección y la energía incidente a distancias de trabajo asignadas en cualquier posición del sistema (generación, transmisión y distribución) [11].

Una vez calculado esta información puede ser utilizada como base para desarrollar estrategias que tienen el objetivo de minimizar las lesiones por quemaduras. Las estrategias incluyen especificar la clasificación del equipo de protección personal (PPE), trabajar sin tensión, aplicar aparatos de protección resistentes al arco y seguir otras técnicas de ingeniería y prácticas de trabajo. A continuación, se muestra la serie de pasos que se deben seguir para completar el proceso basado en la IEEE 1584 [11].

2.4.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DEL SISTEMA Y DE LA INSTALACIÓN

La mayor dificultad, trabajo y esfuerzo en un estudio de arco eléctrico es la recolección de datos de campo, debido que en ocasiones no se encuentra con la información. Si bien muchos de los datos requeridos para este estudio son similares a los datos recopilados para estudios de coordinación de dispositivos de protección y cortocircuitos típicos, se deben incluir todos los equipos de distribución y control de baja tensión más sus alimentadores y circuitos derivados de gran tamaño [11].

Se comienza revisando los diagramas de unifilares y el sitio del equipo eléctrico, los diagramas deben ser actualizados. El estudio debe tener en cuenta todas las fuentes, los grandes motores (más de 37 KW o 50 HP), transformadores, líneas de transmisión, circuitos de distribución, puesta a tierra del sistema eléctrico, reactores limitadores de corriente y otros dispositivos limitadores de corriente, estabilización

de tensión, interruptores de desconexión, centros de control de motores (MCC) , Conmutadores de interruptores de carga. Para transformadores, generadores, motores grandes y conmutadores, se debe tener en cuenta los datos de la placa de identificación. Normalmente se incluye los rangos de voltaje, ampacidad, potencia o voltaje por corriente, corriente, corriente instantánea, impedancia o datos de reactancia transitoria y subtransitoria [11].

2.4.2 LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En un sistema se puede tener muchos modos de funcionamiento, es importante determinar la corriente de cortocircuito disponible para estos modos de funcionamiento, que proporciona las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas disponibles.

2.4.3 LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

Se debe encontrar el valor cuadrático medio (RMS) de la corriente de falla franca y la relación X / R en cada punto de interés del sistema como por ejemplo donde el personal puede trabajar con equipo energizado.

2.4.4 LAS CORRIENTES ARCO

Debe ser determinada la corriente de arco en el punto de interés y la parte de esa corriente que pasa a través del primer dispositivo de protección aguas arriba, además la corriente de arco depende principalmente de la corriente cortocircuito trifásico. La corriente de arco calculada será inferior a la corriente de falla franca debido a la impedancia de arco, especialmente para aplicaciones inferiores a 1000 V [11].

2.4.5 LAS CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN Y LA DURACIÓN DE LOS ARCOS

Se puede contar con las curvas de tiempo vs corriente del sistema. Si no, lo mejor es crearlas, existen programas disponibles comercialmente para realizar esta tarea (NEPLAN entre otros). Por otro lado, para un estudio muy simple, es posible usar características de dispositivos de protección, que se pueden encontrar en los datos del fabricante. Con las curvas del dispositivo de protección se determina el tiempo en que se despeja la falla de arco parámetro importante para la determinación de la energía incidente de un arco eléctrico. La duración del arco depende principalmente del tiempo de disparo del relé más el tiempo de funcionamiento del interruptor. A

continuación, se presenta los tiempos típicos de funcionamiento del interruptor de potencia.

Tabla 2.1. Tiempos de funcionamiento del interruptor de potencia [11].

Clasificación y tipo de interruptor	Tiempo de apertura a 60 Hz [ciclos]	Tiempo de apertura [s]
Baja tensión (<1000 V) en caja moldeada	1.5	0.025
Baja tensión (<1000 V) en caja aislada	3.0	0.050
Media tensión (1-35 kV)	5.0	0.080
Alta tensión (algunos)	8.0	0.130

2.4.6 LAS TENSIONES DEL SISTEMA Y LA CLASE DE EQUIPO

Para cada nodo se documenta la tensión de operación y la clase de equipo. De esta forma se podrá aplicar ecuaciones basadas en clases estándar de equipos y espacios entre conductores como se muestra en la Tabla 2.2.

2.4.7 LAS DISTANCIAS DE TRABAJO

La protección de arco eléctrico se basa en el nivel de energía incidente en la cara y el cuerpo de la persona a la distancia de trabajo, no en la energía incidente en otra parte del cuerpo como brazos o manos. El grado de lesión de una quemadura depende del porcentaje de piel de una persona quemada, como la cabeza y el cuerpo son un gran porcentaje de la superficie total de la piel y las lesiones en estas áreas son mucho más peligrosas para la vida que las quemaduras en las extremidades. Las distancias de trabajo típicas se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Distancias de trabajo típicas [11].

Clases de equipos	Espacio típica entre conductores [mm]	Distancia típica de trabajo [mm]
Interruptor de 15 kV	152	910
Interruptor de 5 kV	104	910
Interruptor de baja tensión	32	610
Centro de control de motores (MCC) y tableros de baja tensión	25	455
Cables	13	455
Otros	No requerido	Se determina en campo

La distancia de trabajo típica es la suma de la distancia entre el trabajador parado frente al equipo a la parte frontal del equipo más la distancia hasta la fuente potencial de arco dentro del equipo.

2.4.8 DETERMINAR LA ENERGÍA INCIDENTE PARA TODOS LOS EQUIPOS

Debe seleccionarse un programa de computadora para realizar el cálculo de la energía incidente. Las ecuaciones de los modelos para este cálculo se describen más adelante, la ventaja del programa de simulación reside en que puede resolver las ecuaciones simultáneamente para múltiples nodos del sistema.

2.4.9 DETERMINAR EL LÍMITE DE PROTECCIÓN DE ARCO ELÉCTRICO PARA TODOS LOS PUNTOS DE INTERÉS

Para hallar la frontera de protección contra el destello, las ecuaciones para encontrar la energía incidente deben resolverse para la distancia desde la fuente de arco a la cara o cuerpo que podría producir una quemadura de segundo grado. Los programas incluyen el límite de protección contra el destello basado en una energía incidente de $5,0 \text{ J/cm}^2$ o $1,2 \text{ cal/cm}^2$.

2.5 MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE DE LA IEEE 1584

Este modelo es empírico, a partir de pruebas de laboratorio hasta 154 kV y basado en el documento de Lee. Es aplicable para sistemas trifásicos en subestaciones al aire libre y sistemas de transmisión y distribución. Además, está pensado para aplicaciones en las que las fallas escalarán a fallas trifásicas, este modelo dará un resultado conservador cuando se encuentran sistemas monofásicos.

2.5.1 RANGOS DEL MODELO

El modelo es aplicable para sistemas con las siguientes características:

- Tensión en el rango de 208 V a 15 000 V, trifásicos.
- Frecuencia de 50 Hz o 60 Hz.
- Corriente de falla franca en el rango de 700 A a 106 000 A.
- Conexión a tierra de todo tipo y sin puesta a tierra.
- Cajas de equipos para tamaños comúnmente disponibles.
- Intervalos entre conductores de 13 mm a 152 mm.

- Fallas de tres fases.

2.5.2 CORRIENTE DE ARCO

Encontrar la corriente de arco trifásico sirve para determinar el tiempo de funcionamiento de los dispositivos de protección. Para aplicaciones con voltaje de sistema inferior a 1000 V se debe resolver la *Ecuación 1*:

Ecuación 1

$$I_g I_a = k + 0.662 I_g I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V(I_g I_{bf}) - 0.00304 G(I_g I_{bf})$$

Donde

- I_g es el $\log_{10}$
- I_a es corriente de arco (kA)
- k es -0.153 para configuraciones abiertas y -0.097 para configuraciones en caja (equipo eléctrico)
- I_{bf} es la posible corriente de cortocircuito trifásico (RMS simétricos) (kA)
- V es la tensión del sistema (kV)
- G es la separación entre conductores (mm)

Para aplicaciones con una tensión de sistema de 1000 V y superior (Media tensión superior a 1000 V e inferior a 57,5 kV), se debe resolver la *Ecuación 2*:

Ecuación 2

$$I_g I_a = 0.00402 + 0.983 I_g I_{bf}$$

En el caso de alta tensión no hace distinción entre la configuración abierta y en caja. Por otro lado, se puede sustituir I_a como:

Ecuación 3

$$I_a = 10^{I_g I_a}$$

Calcular una segunda corriente de arco igual a 85% de I_a , de manera que se pueda determinar una segunda duración de arco.

2.5.3 ENERGÍA INCIDENTE

Primero se debe encontrar el $\log_{10}$ de la energía incidente normalizada. Esta ecuación se basa en datos normalizados para un tiempo de arco de 0,2 segundos y una distancia desde el posible punto de arco a la persona de 610 mm.

Ecuación 4

$$I_g E_n = K_1 + K_2 + 1.081 I_g I_a + 0.0011 G$$

Donde

- E_n es la energía incidente (J/cm^2) normalizada para el tiempo y la distancia
- K_1 es -0.792 para configuraciones abiertas (sin gabinete) y -0.555 para configuraciones en caja (equipo cerrado)
- K_2 es 0 para sistemas sin conexión a tierra o con una alta resistencia a tierra y -0.113 para sistemas conectados a tierra
- G es la separación entre conductores (mm)

Entonces se tiene que:

Ecuación 5

$$E_n = 10^{I_g E_n}$$

Finalmente, se convierte a la forma de:

Ecuación 6

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

Donde

- E es energía incidente (J/cm^2)
- C_f es un factor de cálculo 1.0 para voltajes superiores a 1kV, y 1.5 para tensiones iguales o inferiores a 1 kV
- E_n es la energía incidente normalizada
- t es el tiempo de arco (segundos)
- D es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)
- x es el exponente de distancia.

En la Tabla 2.3 se muestra la distancia típica entre conductores y el factor de distancia respecto al tipo de equipos y la tensión del sistema.

Tabla 2.3. Distancia típica entre conductores y factor de distancia x.

Tensión del sistema [kV]	Tipo de equipo	Distancia típica entre conductores [mm]	Factor de distancia x
0.208 - 1	Aire libre	10 - 40	2.000
	Interruptor	32	1.473
	MCC y paneles	25	1.641
	Cable	13	2.000
Mayor a 1 - 5	Aire libre	102	2.000
	Interruptor	13 - 102	0.973
	Cable	13	2.000
Mayor a 5 - 15	Aire	13 - 153	2.000
	Interruptor	153	0.973
	Cable	13	2.000

2.5.4 MÉTODO DE LEE [11]

Para los casos en que el voltaje es mayor de 15 kV, o la distancia de separación está fuera del rango del modelo, el método de Lee se puede aplicar obteniendo que:

Ecuación 7

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

Donde

- E es energía incidente (J/cm^2)
- V es la tensión del sistema (kV)
- t es el tiempo de arco (segundos)
- D es la distancia desde el posible punto de arco a la persona (mm)
- I_{bf} es la posible corriente de cortocircuito trifásico (kA)

Para tensiones superiores a 15 kV, se considera que la corriente de fallo de arco es igual a la corriente de falla franca.

2.6 LÍMITE DE PROTECCIÓN CONTRA EL RELÁMPAGO

Para el modelo IEEE Std 1584-2002 se tiene que:

Ecuación 8

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

Para el método de Lee se tiene que:

Ecuación 9

$$D_B = \sqrt{2.142 * 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)}$$

Donde

- D_B es la distancia desde el límite al punto de arco (mm)
- C_f es un factor de cálculo 1.0 para voltajes superiores a 1kV, y 1.5 para tensiones iguales o inferiores a 1 kV
- E_n es la energía incidente normalizada
- E_B es la energía incidente en (J/cm^2) a la distancia límite de protección
- t es el tiempo (segundos)
- x es el exponente de distancia
- I_{bf} es la posible corriente de cortocircuito trifásico (kA)

E_B se puede fijar en $5.0 J/cm^2$ para la piel desnuda (sin capucha de protección) o a la calificación del PPE propuesto.

2.7 MÉTODOS DE CÁLCULO DEL ARCO ELÉCTRICO

A continuación, se presentan los posibles métodos para el cálculo del arco eléctrico.

- **Método de tabla en NFPA 70E:** El método más sencillo para determinar los requisitos de EPP para el arco eléctrico es usar las tablas en NFPA 70E. Dan respuestas instantáneas y no requieren casi ningún dato de campo, las tablas no cubren todas las aplicaciones o instalaciones de equipos eléctricos y son conservadoras para la mayoría de las aplicaciones.

- **Método basado en la teoría:** Ralph Lee desarrolló un modelo basado en la teoría del arco eléctrico. Sirvió durante muchos años como el único método disponible. Su mayor limitación es que no incluye un método para encontrar la corriente de arco. También no considera los efectos del aumento del arco en una caja (equipo eléctrico). Para aplicaciones de más de 1000 V, es bastante conservador.
- **Métodos derivados empíricamente basados en un programa de ajuste de curvas:** Desde mediados de 1990 se han ofrecido métodos empíricos basados en la aplicación de un programa de ajuste de curvas a los datos de prueba. Estos métodos se basan en una cantidad limitada de pruebas de laboratorio, donde no incluyen la interacción entre las variables, pero proporcionan resultados razonablemente precisos.
- **Método basado en modelos físicos con algunas pruebas de verificación:** Existe un método basado en el modelo físico e implica el análisis del flujo de calor de cada elemento de un arco teórico al aire libre. El modelo se ha verificado mediante pruebas monofásicas con electrodos separados entre sí de 51 mm a 305 mm y apuntando uno hacia el otro. Este es el único método actualmente disponible para el espaciamiento de electrodos superior a 152 mm que tiene una base de datos de verificación.
- **Método basado en análisis estadísticos y programas de ajuste de curvas:** Este método se basa en el amplio conjunto de datos de prueba, donde está diseñado para sistemas que tienen tensiones en el rango de 208 V-15 000 V, trifásicos y corriente de formación del máximo arco eléctrico en el rango de 700 A-106 000 A. Funciona a frecuencias de 50-60Hz, con conexión a tierra de todo tipo y sin puesta a tierra.

A continuación, se presenta en la Tabla 2.4 los métodos de cálculo de la energía incidente más usados con sus respectivas limitaciones y una breve descripción. La guía NFPA 70E presenta un resumen de los métodos entre ellos el de la IEEE 1584 el cual es el que se desarrolla en este trabajo.

Tabla 2.4. Métodos de cálculo y limitaciones [5].

Fuente	Limitaciones
Ralph Lee, "El otro riesgo eléctrico: quemaduras por relámpago de arco eléctrico"	Calcula la energía incidente y la frontera de relámpago de arco abierto al aire libre; conservador a los 600 V y se hace más conservador al incrementar la tensión
Doughty, et al, "Predicción de la energía incidente para un mejor manejo del riesgo de arco eléctrico en sistemas de distribución de energía de 600 V"	Calcula la energía incidente para arcos en sistemas trifásicos de 600 V y menores; aplica a corrientes de cortocircuito entre 16 kA y 50 kA
IEEE 1584. Guía para realizar los cálculos de relámpago de arco	Calcula la energía incidente de relámpago de arco para: 208 V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; corriente de cortocircuito de 700 A a 106000 A y distancia entre conductores de 13 mm a 152 mm
Doan, "Calculo del relámpago de arco para exposiciones a sistemas de corriente directa"	Calcula la energía incidente para sistemas c.d hasta 1000 V c.d

2.8 METODO PARA EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA FRONTERA DEL RELAMPAGO DE ARCO CON LA NFPA 70E-2015.

Se presenta el método de Ralph Lee que muestra y utiliza esta norma para el cálculo de la frontera de relámpago de arco, donde los amperios simétricos de cortocircuito, I_{sc} , de una falla trifásica sólida en los terminales del transformador se calcula con la siguiente formula:

Ecuación 10

$$I_{sc} = [(MVA \text{ base} \times 10^6) / (1,732 \times V)] \times [1000 / \%Z]$$

Donde I_{sc} está en ampers, V está en volts y $\%Z$ se basa en los MVA del transformador. Un valor típico para la potencia máxima, P (en MW) en un arco trifásico se puede calcular con la Ecuación 11.

Ecuación 11

$$P = (\text{Máxima falla sólida en } MVA_{bf}) \times 0,707^2$$

Ecuación 12

$$P = 1,732 \times V \times I_{sc} \times 10^{-6} \times 0,707^2$$

La distancia de la frontera de relámpago de arco se calcula de acuerdo con la siguiente formula.

Ecuación 13

$$D_c = (2,65 \times MVA_{bf} \times t)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 14

$$D_c = (53 \times MVA \times t)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- D_c Es la distancia entre la persona y una fuente de arco, para una quemadura curable [pies].
- MVA_{bf} Potencia MVA de falla sólida en el punto de consideración [MVA].
- MVA Potencia nominal del transformador [MVA]. Para transformadores por debajo de 0,75 MVA se multiplica por 1,25 los MVA del transformador.
- t Es el tiempo de exposición al arco [s]

Es importante mencionar que el tiempo de despeje para un fusible limitador de corriente es aproximadamente $\frac{1}{4}$ ciclo o 0,004 segundos si la corriente de arco está dentro del rango de la capacidad de limitación de corriente del fusible. Por otro lado, el tiempo de despeje de un interruptor de 5kV a 15 kV es aproximadamente 0,1 segundos o 6 ciclos, si la función instantánea está instalada y operando. Esto se puede desglosar de la siguiente manera: tiempo real del interruptor (aproximadamente 2 ciclos), más el tiempo de operación del relé de aproximadamente 1,74 ciclos, más un margen adicional de seguridad de 2 ciclos, dando un tiempo total de aproximadamente 6 ciclos. Debe agregarse tiempo adicional si hay instalada y operando alguna función de retardo de tiempo.

2.9 METODO PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SUPERIORES A 600 V CON LA NFPA 70E-2015.

El principal método de cálculo de la energía incidente de la NFPA 70E-2015 es el método de Ralph Lee, el cual es muy conservador como se mencionó en la Tabla 2.4. A continuación, se muestra este método el cual es válido para valores

superiores a 600 V y los parámetros requeridos para hacer los cálculos son los siguientes:

- Máxima corriente de falla de cortocircuito trifásico sólido disponible en el equipo.
- El tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba de la localización del posible arco) a la máxima corriente de cortocircuito. Si el tiempo total de despeje del dispositivo de protección es superior a 2 segundos, considerar cuanto tiempo es probable que una persona permanezca en el lugar del relámpago de arco. Es probable que una persona expuesta a un relámpago de arco se alejara rápidamente si ello es físicamente posible, y 2 segundos es un tiempo máximo razonable para el cálculo. Una persona que esté en un camión canastilla o que se ha introducido en un equipo necesitara más tiempo para salir y alejarse. Debe considerarse un sólido criterio de ingeniería en la aplicación del tiempo de despeje máximo de 2 segundos, dado que podría haber circunstancias en las que el egreso de un empleado este inhibido.
- La distancia a la fuente de arco
- Valor nominal de la tensión fase-fase del sistema.

Ecuación 15

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2}$$

Donde:

- E es la energía incidente [Cal/cm^2]
- F es la corriente de falla de cortocircuito [kA]
- V es la tensión fase a fase del sistema [kV]
- t_A es la duración del arco [s]
- D es la distancia la fuente de arco [pulgadas]

CAPITULO 3

CASOS DE ESTUDIO Y SIMULACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA INCIDENTE DE UN ARCO ELÉCTRICO EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN.

En este capítulo se presenta los casos de estudio o ejemplos para la determinación de la energía incidente de un arco eléctrico en una instalación de media tensión mediante el método de las normas NFPA 70E e IEEE 1584. Además, se muestra como simular éstos mediante la herramienta NEPLAN ELECTRICITY.

3.1 HERRAMIENTA NEPLAN ELECTRICITY

La herramienta NEPLAN sirve para analizar, planear, optimizar y simular redes de transmisión, distribución y generación. Con esta se puede realizar cálculos de estado estable, calidad de potencia, aspectos de optimización y coordinación de protecciones.

NEPLAN cuenta con varios paquetes entre ellos el modulo básico el cual permite el cálculo del arco eléctrico, el cual está completamente integrado y basado en los módulos de cortocircuito y análisis de selectividad de NEPLAN. Permite calcular la energía incidente para la corriente de arco reducida y no reducida en función de la distancia de trabajo y automáticamente determina los tiempos de aclaración de Fallas. También determina las contribuciones individuales de corriente de arco.

3.2 CASOS DE ESTUDIO

En la guía NFPA 70E se presentan algunos ejemplos de cálculo de la energía incidente básicos por medio de métodos distintos al de la IEEE 1584, estos ejemplos carecen de información para poder calcular la energía incidente mediante el método de la IEEE 1584 por estas razones se selecciona otros ejemplos diferentes de las normas.

3.2.1 EJEMPLO 1

Aunque el trabajo está dirigido a calcular la energía incidente en media tensión uno de los casos de estudio se desarrollara en baja tensión ya que es en este rango donde más los empleados realizan su trabajo. El ejemplo parte después del estudio previo del proceso de análisis de riesgo por arco eléctrico (detallado en[12]) en el cual se recolecta la información necesaria para la aplicación del método de la IEEE

1584. A continuación, se presenta el diagrama unifilar del ejemplo 1 de la planta Ford Motor de Venezuela, S.A.

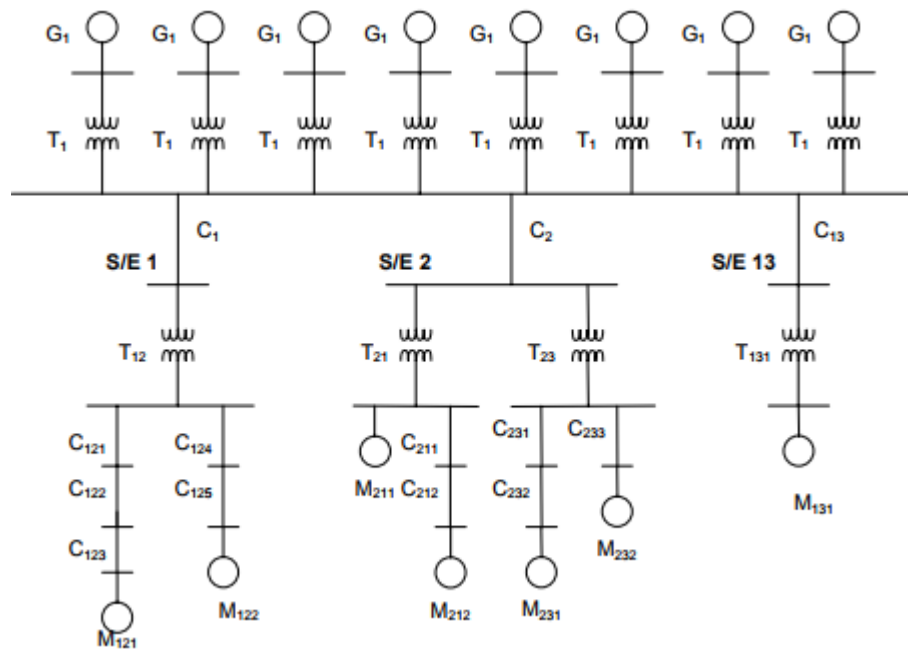


Figura 3.1. Diagrama unifilar sistema alimentado por 8 generadores de combustión a gas [12].

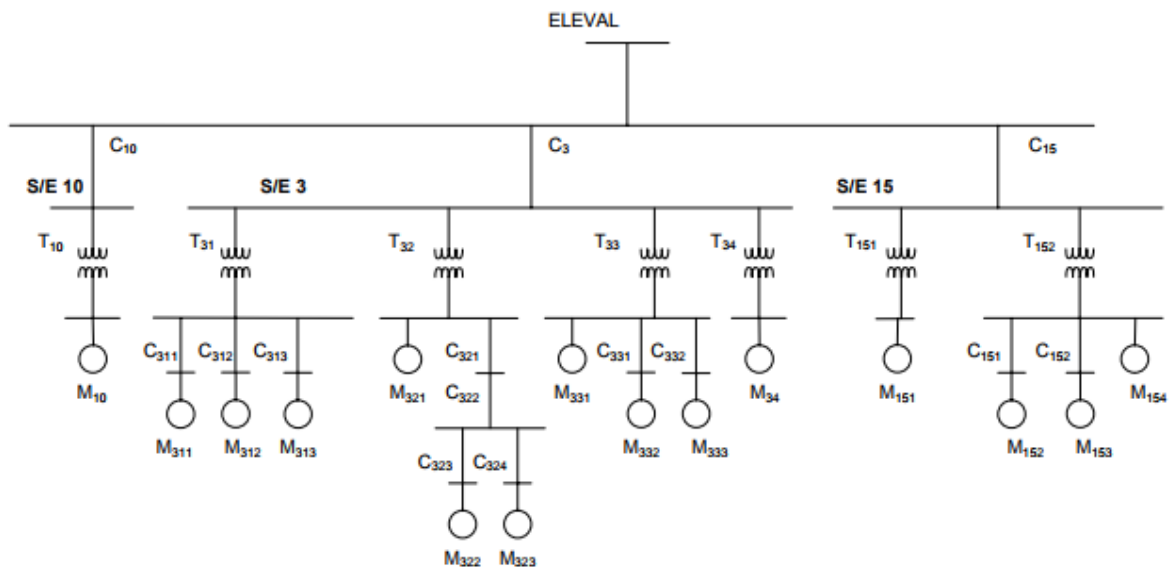


Figura 3.2. Diagrama unifilar sistema alimentado por línea de transmisión [12].

La recolección de información del sistema como la corriente de cortocircuito trifásico se muestra en la Tabla 3.1 y el tiempo en que actúan las protecciones frente a una falla en cada tablero se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Información cortocircuito ejemplo 1.

Subestación	Cortocircuito trifásico de MT [kA]
1	2,713
2	2,725
13	2,710
10	4,55
3	4,4
15	4,3

Tabla 3.2. Información del tiempo de arco y cortocircuito de cada tablero.

Subestación	Nombre	Tiempo de arco [s]	Cortocircuito trifásico de BT [kA]
1	Tablero principal T12	0,015	19,6448
	Tablero 153	0,015	19,0077
	Tablero 150	0,025	15,1255
	Tablero CCM 301	0,025	11,9958
	Tablero 151	0,015	18,3604
	Tablero 193	0,025	6,8217
2	Tablero principal T21	0,095	19,9640
	Tablero 142	0,015	11,4963
	Tablero CCM 003	0,025	6,4605
	Tablero principal T23	0,015	18,1458
	Tablero 125	0,015	17,4990
	Tablero 213	0,025	4,7017
	Tablero 124	0,015	16,9172
13	Tablero principal T131	0,050	19,3400
10	Tablero principal T10	0,050	5,5347
3	Tablero principal T31	0,095	21,1704
	Tablero 301	0,025	10,7214
	Tablero 255	0,015	13,1361
	Tablero CCM TE	0,015	15,2278
	Tablero principal T32	0,015	22,2480
	Tablero 249	0,015	21,3618
	Tablero 223	0,025	11,1563
	Tablero CCM 500	0,025	7,5426
	Tablero CCM 407	0,025	6,7933
	Tablero principal T33	0,015	23,0782

Subestación	Nombre	Tiempo de arco [s]	Cortocircuito trifásico de BT [kA]
	Tablero 229	0,015	14,3129
	Tablero 251	0,015	22,1460
15	Tablero principal T34	0,050	22,2621
	Tablero principal T151	0,050	37,0480
	Tablero principal T152	0,050	36,4299
	Tablero 034	0,025	3,3082
	Tablero 020	0,025	4,3494

A continuación, se realiza la guía o el proceso de cálculo para el tablero principal T31, tomando la configuración de la caja $K = -0,097$, la separación entre conductores $G = 32 \text{ mm}$ y la tensión del sistema $V = 0,48 \text{ kV}$. Teniendo en cuenta la propiedad de los logaritmos:

$$\log_b x = y \Leftrightarrow b^y = x$$

Se obtiene.

$$I_a = 10^{k+0.662 I_g I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V(I_g I_{bf}) - 0.00304 G(I_g I_{bf})}$$

Sustituyendo los valores.

$$I_a = 10,9080 \text{ A}$$

Luego se procede a calcular la energía normalizada con la Ecuación 4, teniendo en cuenta que $K_1 = -0,555$ para configuraciones en caja (equipo cerrado) y $K_2 = 0$ para sistemas sin conexión a tierra o con una alta resistencia a tierra.

$$I_g E_n = K_1 + K_2 + 1.081 I_g I_a + 0.0011 G$$

Luego.

$$E_n = 10^{K_1 + K_2 + 1.081 I_g I_a + 0.0011 G}$$

Reemplazando los valores se tiene que:

$$E_n = 3,9995$$

Entonces se procede mediante la Ecuación 6 a calcular la energía incidente, Considerando que la distancia desde el posible punto de arco a la persona es $D = 610 \text{ mm}$, el exponente de distancia $x = 1,641$ y el factor $C_f = 1,5$.

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

$$E = 6,2752 \text{ (J/cm}^2\text{)} = 1,4998 \text{ (Cal/cm}^2\text{)}$$

Por último, se calcula la protección contra el relámpago por medio de la Ecuación 8, donde la energía incidente a la distancia límite de protección $E_B = 5,0 \text{ J/cm}^2$ para la piel desnuda (sin capucha de protección). La cual nos indica la distancia límite de aproximación a las partes energizadas en la que una persona puede tener una quemadura de segundo grado ante la presencia de un arco eléctrico.

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

$$D_B = 700,5669 \text{ mm}$$

A si mismo se realizaron los cálculos de los demás puntos del sistema realizados con ayuda de una hoja de cálculo en Excel y constatando con los resultados del documento fuente, los resultados se observan en anexos 1.2.

3.2.2 EJEMPLO 2

El procedimiento para calcular la energía incidente en media tensión es el mismo mostrado en el ejemplo 1 de baja tensión, con la diferencia que se utiliza la Ecuación 2 en vez de la Ecuación 1. Para este ejemplo se seleccionó el caso de estudio 1 del trabajo de grado de Joan Andrés Mosquera Rodríguez y Daniel Fernando Mera Muñoz [13], en este se encuentra como determinar las corrientes de cortocircuito trifásicas y los tiempos de operación de las protecciones (relé de sobrecorriente) teóricamente como con ayuda de la herramienta NEPLAN.

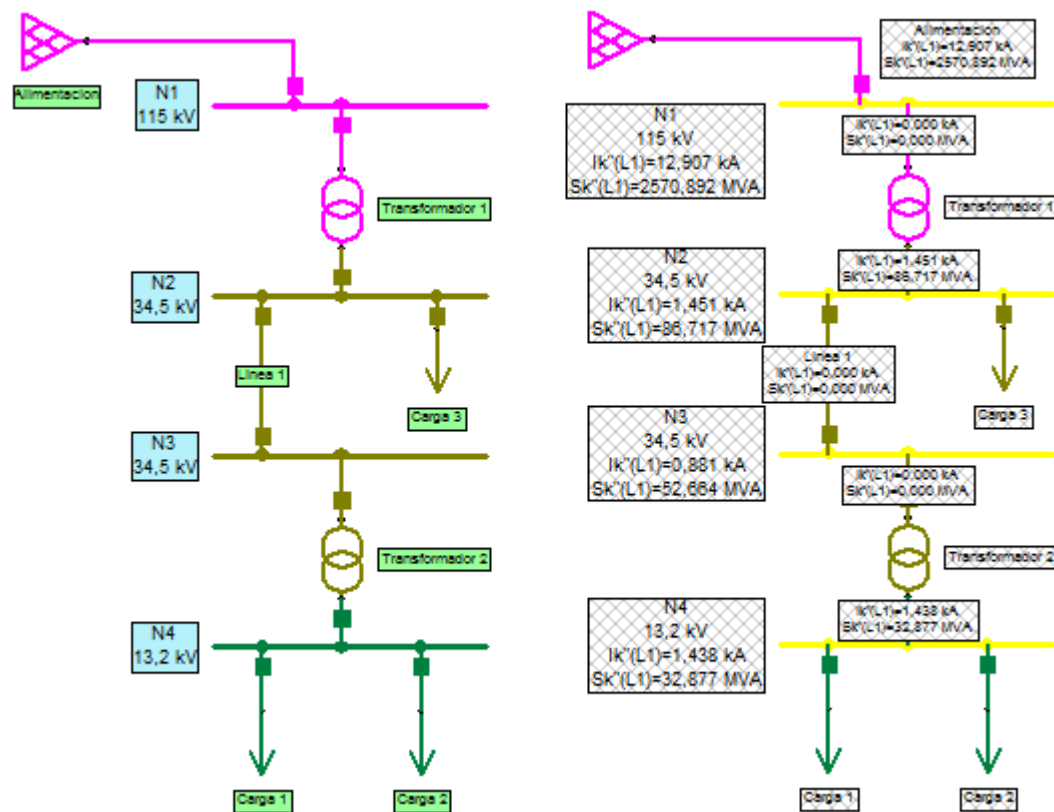


Figura 3.3. Diagrama unifilar ejemplo 2 y cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico simulado en NEPLAN.

Tabla 3.3. Corriente de cortocircuito en NEPLAN.

Nodo bajo falla	Corriente de cortocircuito simulada en NEPLAN [kA]
1	12,907
2	1,451
3	0,881
4	1,438

Para determinar los tiempos de operación en que las protecciones actúan es necesario conocer las curvas de tiempo del relé que se está usando, en este caso el relé utilizado es el WHESTINHOUSE CO-11, se sigue con el ejemplo realizando los pasos necesarios para implementar el relé en NEPLAN mostrado en detalle en el trabajo de grado [13] ya mencionado para este ejemplo.

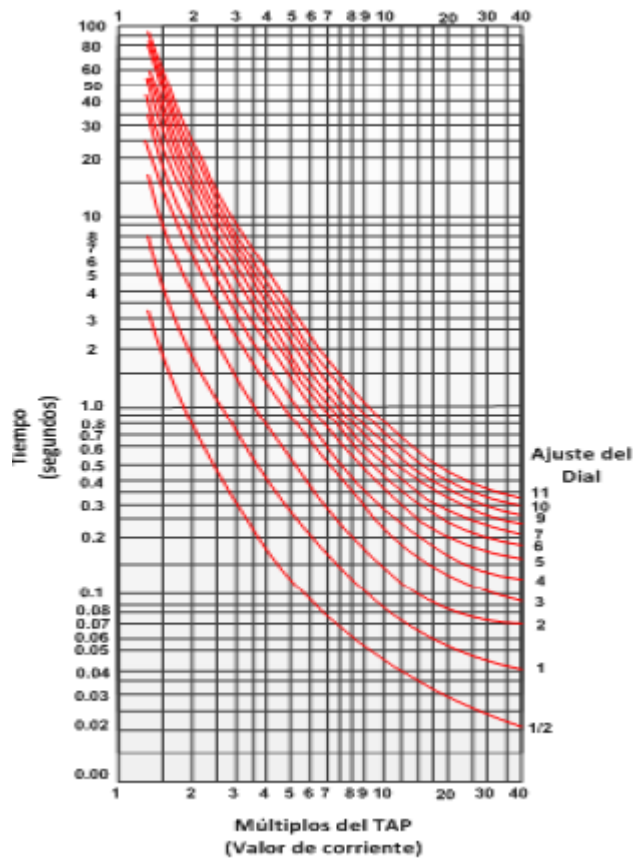


Figura 3.4. Curvas del relé WHESTINHOUSE CO-11

A continuación se presenta un ejemplo de los tiempos (recuadros amarillos) en que actúan las protecciones al presentarse una falla en el nodo 4 (N4 color rojo) en NEPLAN, se observa que el relé del transformador 2 de la parte de baja actúa en 0,17 segundos, si este por algún motivo no opera, entonces opera su respaldo (relé del transformador 2 parte de alta) en 0,76 segundos y también se muestra los tiempos en que actúan los relés de la línea y del transformador 1 de baja si no actúan las protecciones aguas abajo.

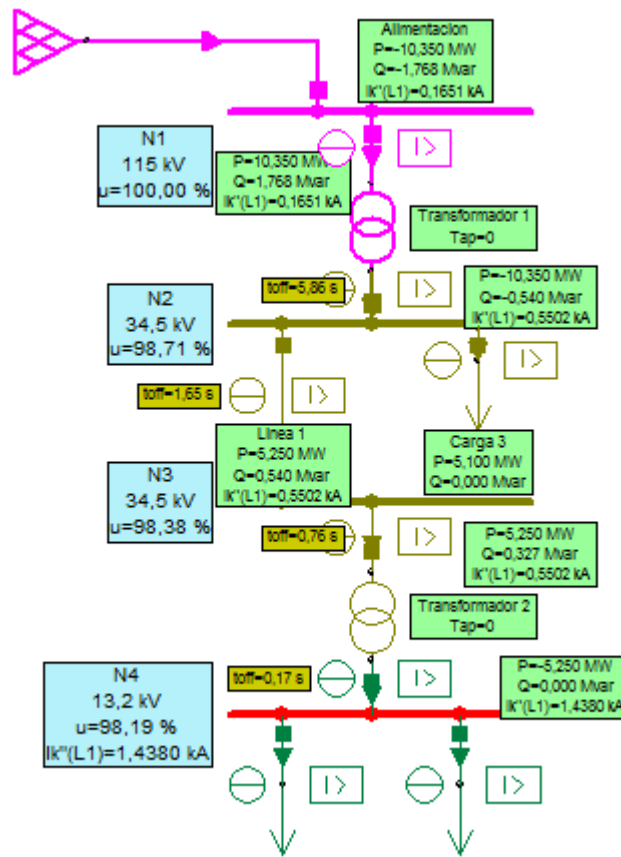


Figura 3.5. Tiempos de operación de los relés frente a una falla en el nodo 4.

Teniendo en cuenta que se realizaron ajustes en los diales para garantizar selectividad y coordinación de las protecciones. Entonces el tiempo en que el relé actúa ha cambiado y de esta forma el tiempo de cada respaldo, como se muestra en la Figura 3.6.

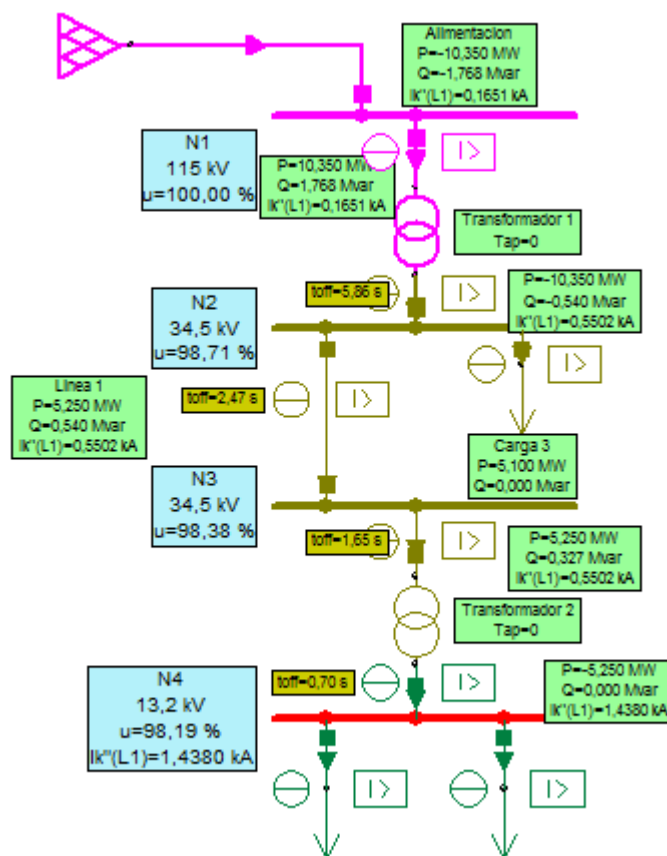


Figura 3.6. Tiempos de los relés frente a una falla en el nodo 4 con selectividad.

Simulando una falla trifásica para todos los relés y observando los tiempos en que actúan, se tiene la siguiente tabla, donde los resultados del caso descrito anteriormente se pueden observar en la fila 3.

Tabla 3.4. Tiempos de disparo para una falla trifásica en cada relé.

Falla	Tiempos de disparo [s]							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
R1	0,06	---	0,70	1,65	2,47	---	5,86	---
R2	---	0,06	0,70	1,65	2,47	---	5,86	---
R3	---	---	0,70	1,65	2,47	---	5,86	---
R4	---	---	---	0,32	1,02	---	1,87	6,22
R5	---	---	---	---	0,72	---	1,26	3,63
R6	---	---	---	---	---	0,05	0,70	1,90
R7	---	---	---	---	---	---	0,70	1,90
R8	---	---	---	---	---	---	---	0,07

Donde:

- R1 es el relé de la carga 1.
- R2 es el relé de la carga 2
- R3 es el relé del transformador 2 de baja
- R4 es el relé del transformador 2 de alta
- R5 es el relé de la línea
- R6 es el relé de la carga 3
- R7 es el relé del transformador 1 de baja
- R8 es el relé del transformador 1 de alta

Teniendo la corriente de cortocircuito trifásica y los tiempos de duración del arco que son determinados por los tiempos de disparo de los relés, aunque se debe agregar el tiempo en que actúa el interruptor (ver Tabla 2.1) en este caso ejemplo se toma el tiempo de duración del arco igual al tiempo de disparo del relé por cuestiones prácticas. Se realiza el cálculo teórico mediante la ecuación 2 para el mismo ejemplo (fila R3):

- Caso 1: hay una falla trifásica en el nodo 4 y el relé 3 lo detecta.
- Caso 2: R3 no detecta la falla trifásica y su respaldo R4 sí.
- Caso 3: R3 y R4 no detecta la falla trifásica y su respaldo R5 sí.
- Caso 4: R3, R4 y R5 no detecta la falla trifásica y su respaldo R7 sí.

$$I_g I_a = 0.00402 + 0.983 I_g I_{bf}$$

$$I_a = 1,4424 \text{ kA}$$

La corriente de arco es la misma para las diferentes variantes del ejemplo que se está trabajando, debido que no depende de la tensión, la separación entre conductores y la configuración, que si estaba presente en el ejemplo 1 (baja tensión). Luego se procede a calcular la energía normalizada con la Ecuación 4, suponiendo que se desea calcular un arco eléctrico en un interruptor de media tensión que presenta alguna avería y de esta forma se tiene que $K_1 = -0,555$ para configuraciones en caja (equipo cerrado), $K_2 = 0$ para sistemas sin conexión a tierra o con una alta resistencia a tierra y la separación entre conductores $G = 152 \text{ mm}$ (ver Tabla 2.3).

$$I_g E_n = K_1 + K_2 + 1.081 I_g I_a + 0.0011 G$$

Reemplazando los valores se tiene que:

$$E_n = 0,4690$$

La energía incidente normalizada es la misma para los diferentes casos del ejemplo que se está trabajando, debido que K_1 , K_2 , G y I_a son las mismas. Entonces se procede mediante la Ecuación 6 a calcular la energía incidente, Considerando que la distancia desde el posible punto de arco a la persona es $D = 910 \text{ mm}$ (ver Tabla 2.2), el exponente de distancia $x = 0,973$ (ver Tabla 2.3) y el factor $C_f = 1$.

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

$$E = 4,6540 \text{ (J/cm}^2\text{)} = 1,1123 \text{ (Cal/cm}^2\text{)} \quad \text{Caso 1}$$

$$E = 10,9700 \text{ (J/cm}^2\text{)} = 2,6219 \text{ (Cal/cm}^2\text{)} \quad \text{Caso 2}$$

$$E = 16,4218 \text{ (J/cm}^2\text{)} = 3,9250 \text{ (Cal/cm}^2\text{)} \quad \text{Caso 3}$$

$$E = 38,9603 \text{ (J/cm}^2\text{)} = 9,3119 \text{ (Cal/cm}^2\text{)} \quad \text{Caso 4}$$

Por último se calcula la protección contra el relámpago por medio de la Ecuación 8, donde la energía incidente a la distancia límite de protección $E_B = 5,0 \text{ J/cm}^2$ para la piel desnuda (sin capucha de protección). La cual nos indica la distancia límite de aproximación a las partes energizadas en la que una persona puede tener una quemadura de segundo grado ante la presencia de un arco eléctrico.

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

$$D_B = 845,34 \text{ mm} \quad \text{Caso 1}$$

$$D_B = 2040,56 \text{ mm} \quad \text{Caso 2}$$

$$D_B = 3089,04 \text{ mm} \quad \text{Caso 3}$$

$$D_B = 7506,47 \text{ mm} \quad \text{Caso 4}$$

Para el cálculo de la energía incidente de un arco eléctrico implementado en NEPLAN se debe seguir la siguiente guía o proceso que muestra los pasos

detallados. Se debe tener el sistema de estudio implementado en NEPLAN como se muestra en la Figura 3.6. El detalle de este se puede observar en el documento guía de este ejemplo [13].

1. El primer paso es ubicar el nodo en el cual se requiere simular la falla trifásica, para esto se va a la barra de opciones de menú y se selecciona análisis.
2. Luego se selecciona la opción cortocircuito.
3. Posteriormente la opción parámetros como se muestra en la Figura 3.7.

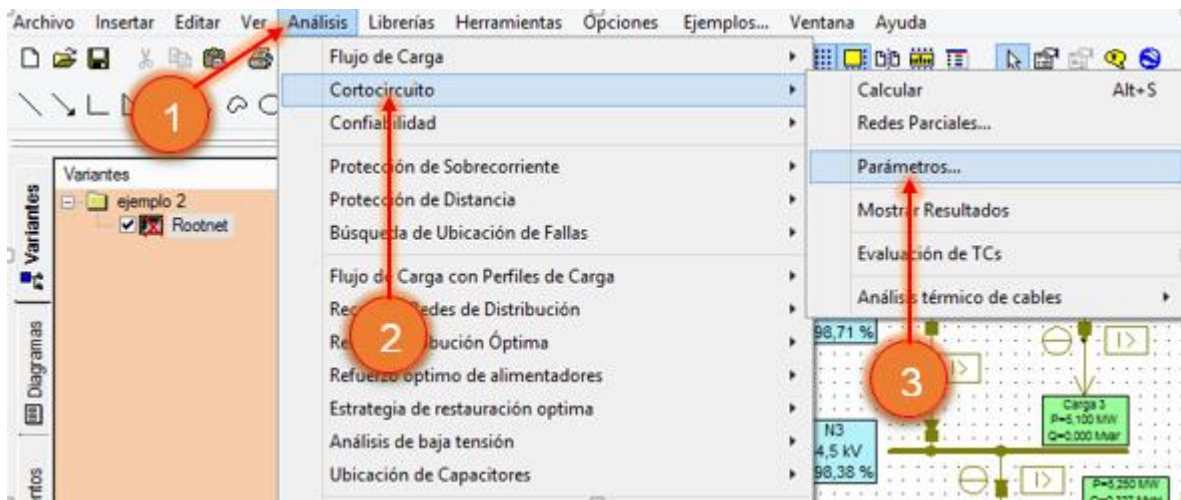


Figura 3.7. Paso uno para cálculo de energía incidente NEPLAN.

4. Luego aparece el recuadro de parámetros de cortocircuito, en él se debe seleccionar la opción nodos de falla.
5. Consecutivamente se selecciona el nodo que se desea este en falla, en nuestro caso de ejemplo se selecciona el nodo 4.
6. Después se pasa el nodo o nodos seleccionados al recuadro nodos seleccionados como se observa en la siguiente Figura 3.8.

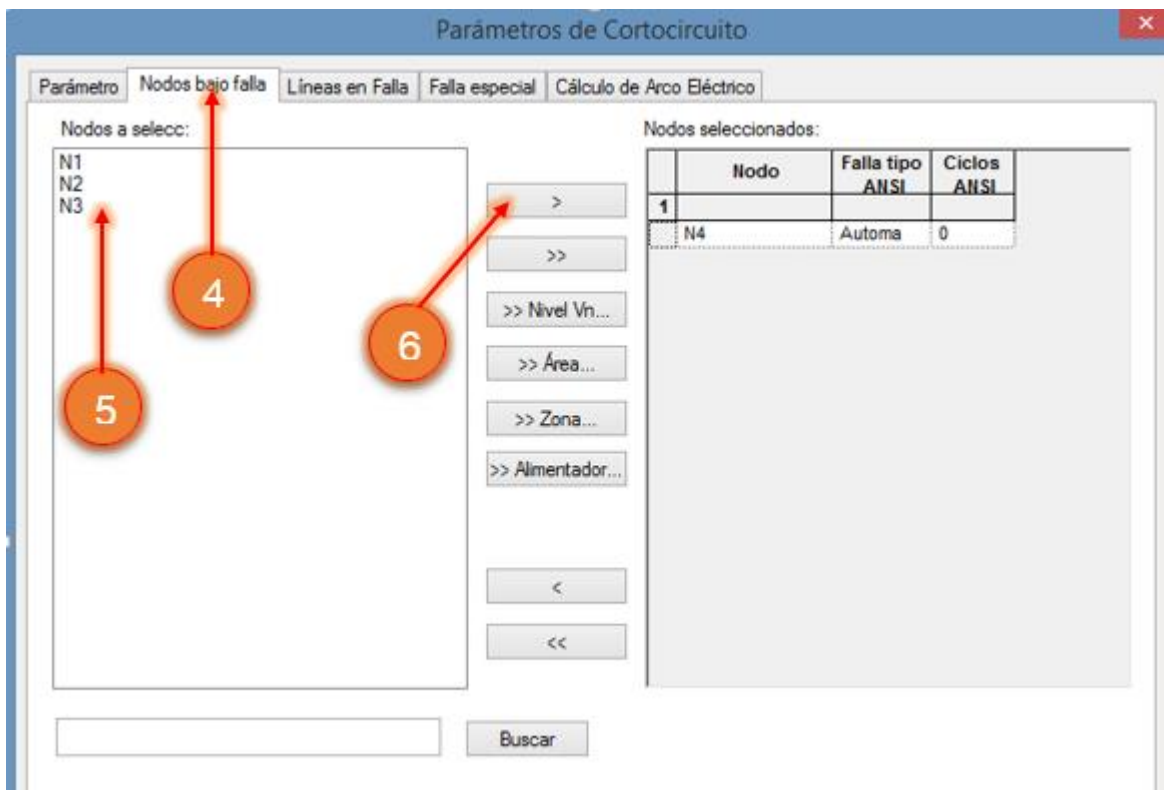


Figura 3.8. Paso dos para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

7. En el mismo recuadro de parámetros de cortocircuito se selecciona la opción de Cálculo de Arco Eléctrico.
8. Se debe elegir (✓) la opción Cálculo de Arco Eléctrico.
9. Luego se procede a seleccionar la norma con la cual se desea realizar el cálculo, se encuentra la opción IEEE 1584 – 2002 (la que se utiliza en este ejemplo) y la NFPA 70E – 2012.
10. Se debe escoger entre las opciones de Sistema puesto a tierra y Sist. De P. Tierra aislado y alta resistencia, esto corresponde a K_2 que en nuestro caso es sistema puesto a tierra
11. En seguida en la opción Energía Incidente a la distancia del límite de protección de arco se coloca el valor 5 y se selecciona las unidades como se muestra en la Figura 3.9. Este valor hace referencia a E_B que se puede fijar en $5.0 J/cm^2$ para la piel desnuda (sin capucha de protección) o a la

calificación del PPE propuesto, por otro lado se debe fijar en 1.2 Cal/cm^2 para si se selecciona las otras unidades Cal/cm^2 .

Figura 3.9. Paso tres para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

12. Posteriormente en la opción Tiempo de clarificación de falla (valor por defecto) el valor en segundos corresponde a los tiempos de disparo de la Tabla 3.4. En este caso se ingresa 0,7 que es el tiempo en que actúa el Relé 3 para una falla en el nodo 4. Se debe tener en cuenta que el tiempo del arco es la suma del tiempo del disparo del relé y el tiempo de apertura del interruptor.

13. En el tiempo de apertura del interruptor en ciclos se coloca el valor 0, debido que en este caso didáctico no se consideró el tiempo de apertura del interruptor, para un caso real se toma el valor de la Tabla 2.1.

Se debe verificar y si es el caso incluir los motores iguales o mayores a 50 HP ya que estos aportan al nivel de cortocircuito, si se considera que un motor de menor potencia aporta a este. Se selecciona la opción considerar motores menores a 37 kW (50 HP).

14. En la distancia de trabajo mínima se ingresa el valor correspondiente de la Tabla 2.2 que en este ejemplo es 910 mm. Además, es necesario colocar

valores en las opciones incremento para la distancia de trabajo y la distancia máxima de trabajo, en estos se coloca un incremento para la distancia de trabajo típica que es de 150 mm y el valor para la distancia máxima de trabajo es la suma del incremento para la distancia de trabajo y la distancia mínima de trabajo, es decir de 1060 mm.

15. En la opción de unidades de salida se selecciona para valores de distancia *mm* y para valores de energía *J/cm²*.

16. Por último se da en aceptar. Los pasos del 12 al 16 se muestran en la Figura 3.10.

Parámetros de Cortocircuito

Parámetro | Nodos bajo falla | Líneas en Falla | Falla especial | Cálculo de Arco Eléctrico

☒ Cálculo de Arco Eléctrico

Norma: IEEE 1584 - 2002

Tierra: Sistema Puesto a Tierra

Energ. incid. a la dist. del límite de protecc. del arco: 5 en ☐ Cal/cm2 ☒ J/cm2

Porcent. de Reducc. de Corriente .. %: 85

Tiempo de clarific. de falla (valor por defecto) .. s: 0,7

Tiempo de apertura del interruptor en ciclos: 0

☐ Considerar Motores menores a 37kW (50Hp) ☐ Consider motor stopping time

☐ Característica del Fusible solo para tiempo de Fusión Motor stopping time .. s: 0

Dist. de Trabajo para cálculo de Arco Eléctrico

Dist. de Trabajo mínima: 910

Incremento para la dist. de trabajo: 150

Distancia máx. de trabajo: 1060

Unidades

☐ pulg. ☒ mm

Unidades para salida

para valores de dist. ☐ pulg. ☒ mm

para valores de energía ☐ Cal/cm2 ☒ J/cm2

Valores por defecto

Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda

Figura 3.10. Paso cuatro para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

17. Luego se da doble clic en el nodo donde se va a simular la falla trifásica, en este ejemplo es el nodo 4. En seguida se abre la ventana del nodo la cual sirve para cambiar los parámetros de este, nos interesa el recuadro de Arco Eléctrico.
18. En la opción tipo de equipo están: aire libre, cable, interruptor (switchgear) y CCM y motores. En este caso se selecciona switchgear.
19. La opción espacio entre conductores se refiere a la distancia de separación entre conductores G en mm, se escoge de acuerdo a la Tabla 2.3 y se coloca el valor de 152 para este ejemplo, por último, se da clic en aceptar.

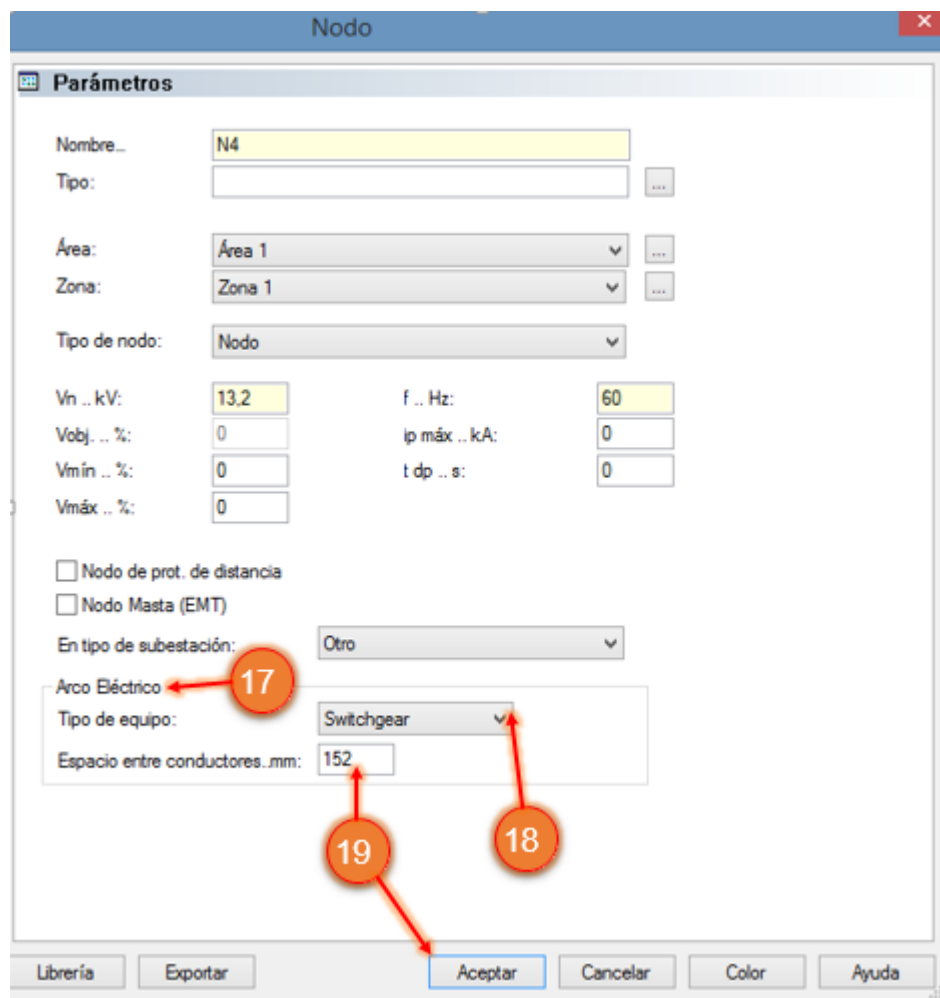


Figura 3.11. Paso cinco para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

20. A continuación, se procede a realizar la simulación, para esto se va a la opción de análisis en la barra de opciones de menú.

21. Se da clic en cortocircuito y después en calcular, como se muestra en la Figura 3.12.

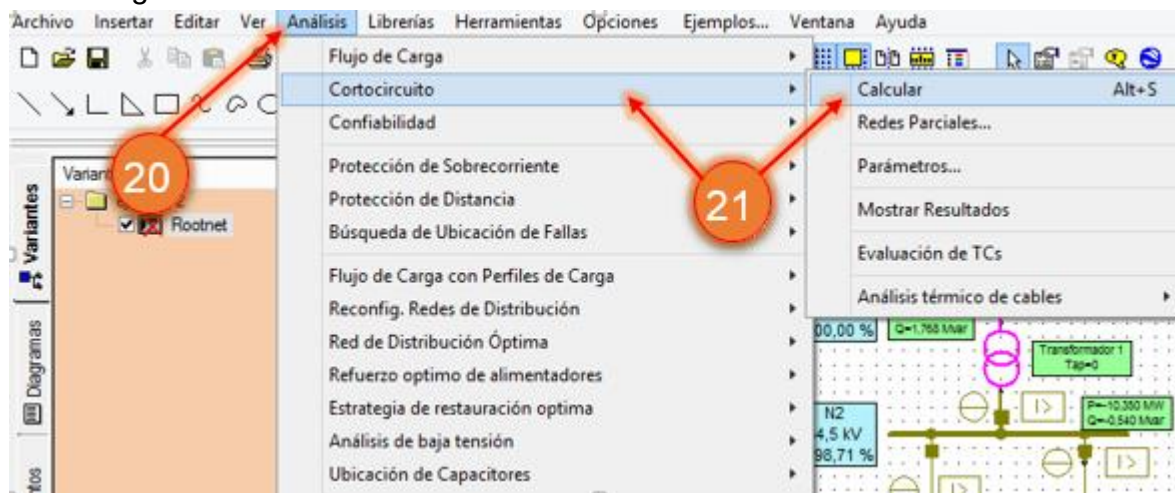


Figura 3.12. Paso seis para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

22. Si se desea agregar los resultados en el área de trabajo, lo que se debe hacer es dar clic derecho sobre esta y seleccionar propiedades del diagrama como se muestra en la Figura 3.13.

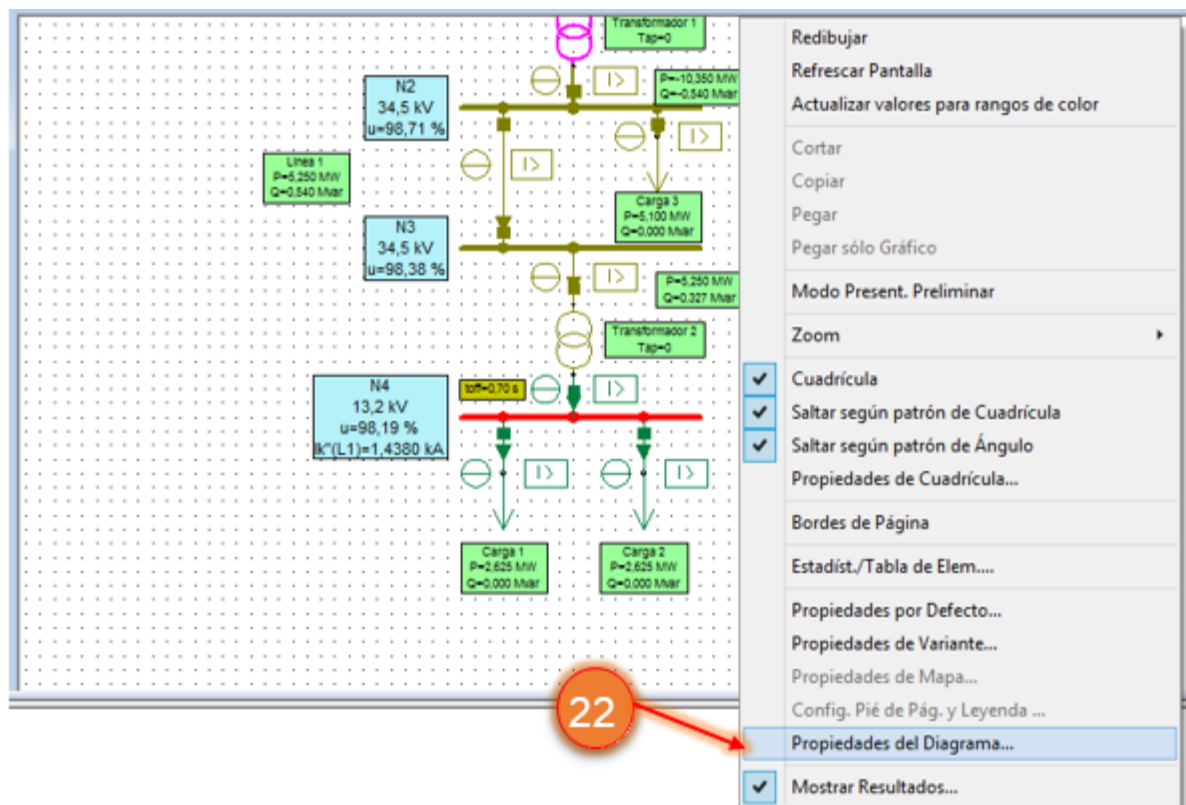


Figura 3.13. Paso siete para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

23. En seguida se abre la ventana propiedades del diagrama, en ella se debe seleccionar la opción cortocircuito.
24. Se debe elegir (✓) la opción Resultados en el recuadro Arco Eléctrico y dar clic en aceptar como se muestra en la Figura 3.14.

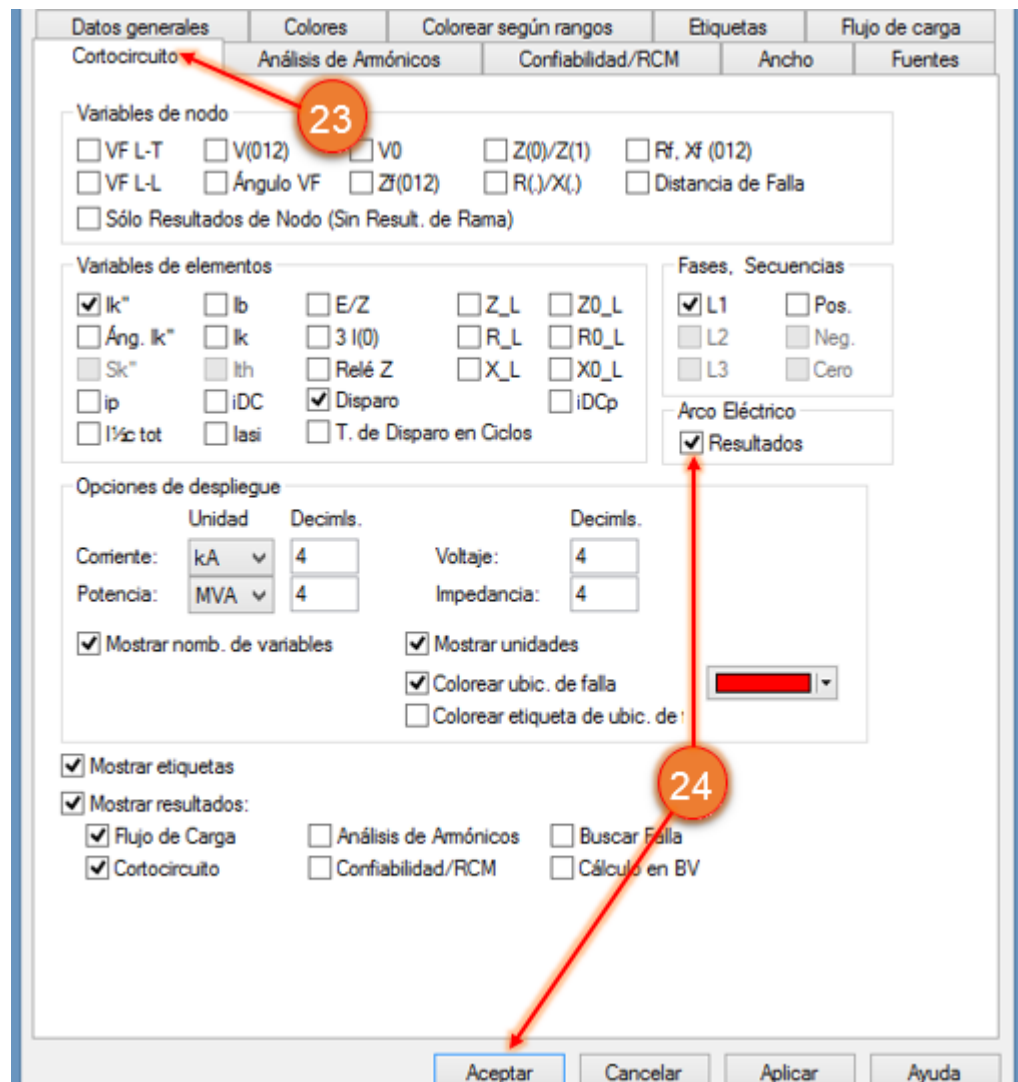


Figura 3.14. Paso ocho para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

25. De esta forma se muestra en el área de trabajo los resultados del cálculo de la energía incidente para el caso 1, como se observa en la Figura 3.15.

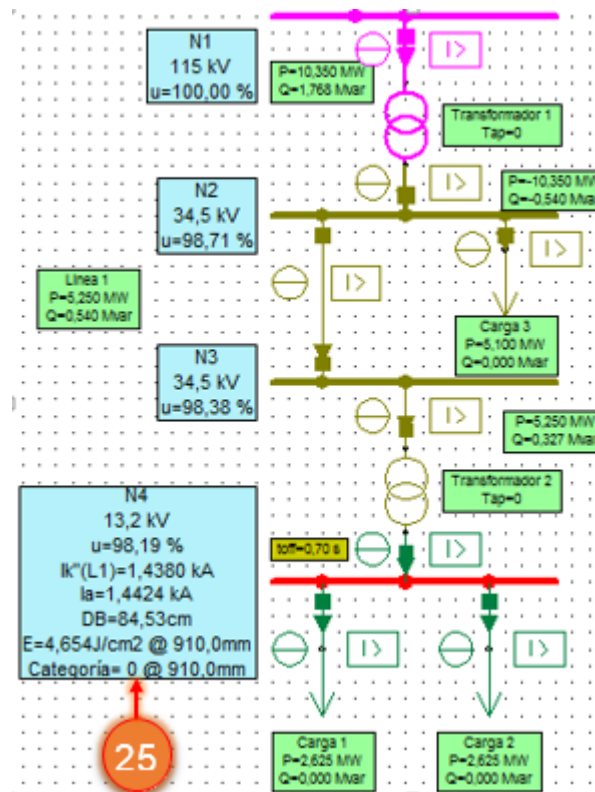


Figura 3.15. Resultado del caso 1

26. Es importante aclarar que al momento de realizar el cálculo de Arco Eléctrico en NEPLAN la opción Dist. De falla (No de nodos) para mostrar resultados, automáticamente toma el valor de cero, este parámetro indica el número de nodos aguas arriba entonces en nuestro caso solo muestra los valores de corriente de cortocircuito y los tiempos para el Réle 3 que se encuentra en el nodo 4. Para ver esta opción se debe ir a la opción de análisis en la barra de opciones de menú, cortocircuito y parámetros como en los pasos 1, 2 y 3.

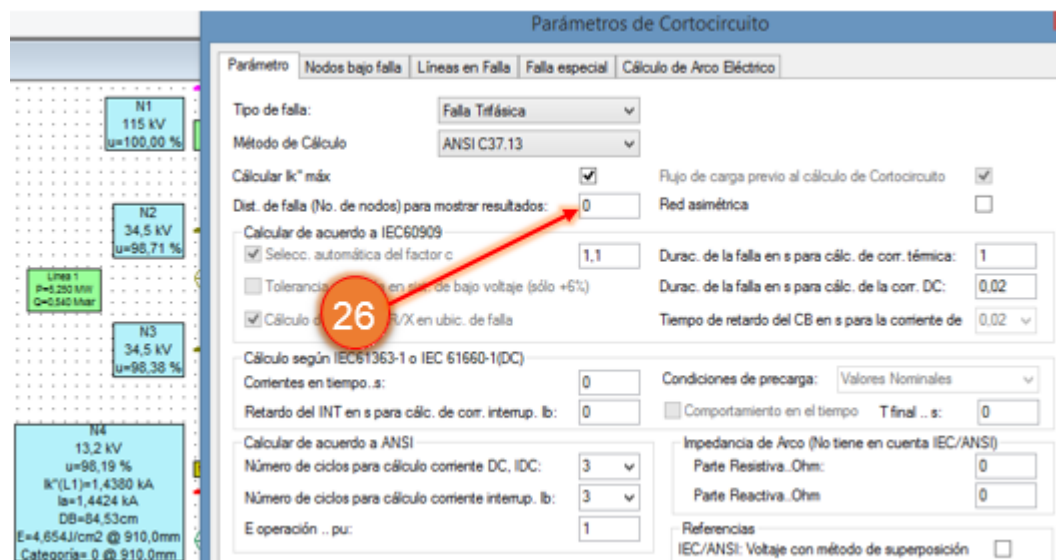


Figura 3.16. Consideración del número de nodos calculados.

27. Existe otra forma para presentar los datos calculados, este es mediante una tabla y para esto se debe ir a la opción Análisis, cortocircuito y mostrar resultados.



Figura 3.17. Paso nueve para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

28. Inmediatamente se abre la ventana resultados de cortocircuito, en esta se selecciona la opción Resultados de Arco Eléctrico y se despliega una ventana con los resultados, entre ellos está el nodo de la falla, la corriente de arco eléctrico, la energía incidente, el límite de protección, el tiempo de duración de arco y la categoría entre otros.

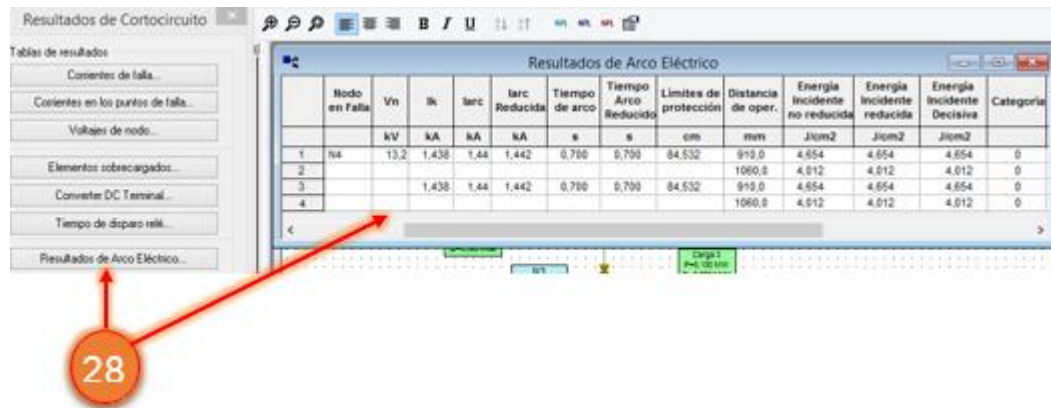


Figura 3.18. Paso diez para el cálculo de la energía incidente en NEPLAN.

Para los casos 2, 3 y 4 se repitió el mismo procedimiento, teniendo en cuenta los tiempos de la Tabla 3.4. Por otro lado se realizó el cálculo mediante el procedimiento de la NFPA 70E-2015, según lo visto en la Tabla 2.4 y observando los resultados implementando la Ecuación 15 los resultados son bastante conservadores respecto a los de la guía IEEE 1584.

$$E = \frac{793 \times (1,4424) \times (13,2) \times (0,7)}{(910 \times 0,0393701)^2} = 8,2343 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2} = 34,4517 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \quad \text{Caso 1}$$

$$E = \frac{793 \times (1,4424) \times (13,2) \times (0,7)}{(910 \times 0,0393701)^2} = 19,4094 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2} = 81,2075 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \quad \text{Caso 2}$$

$$E = \frac{793 \times (1,4424) \times (13,2) \times (0,7)}{(910 \times 0,0393701)^2} = 29,0553 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2} = 121,5652 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \quad \text{Caso 3}$$

$$E = \frac{793 \times (1,4424) \times (13,2) \times (0,7)}{(910 \times 0,0393701)^2} = 68,9328 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2} = 288,4097 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \quad \text{Caso 4}$$

Para implementarlos en NEPLAN se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero en el paso 9 se selecciona la norma NFPA 70E – 2012. De esta manera puede ver el resultado tanto de la energía incidente como de la distancia frontera del relámpago de arco para el caso 1 en la Figura 3.19.

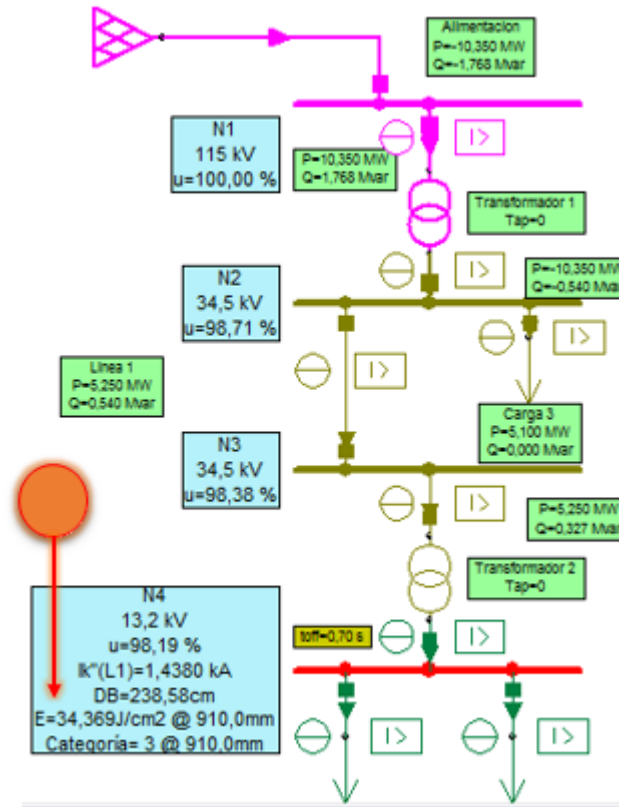


Figura 3.19. Resultado energía incidente caso 1 NFPA 70E.

Por otro lado, se calcula la distancia frontera del relámpago de arco con la norma NFPA 70E-2015 con la Ecuación 13 para los casos del ejemplo 2.

$$D_c = (2,65 \times MVA_{bf} \times t)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_c = (2,65 \times (1,732 \times 13,2 \times 1,4424) \times 0,7)^{\frac{1}{2}} = 7,82 \text{ ft} = 238,32 \text{ cm} \quad \text{Caso 1}$$

$$D_c = (2,65 \times (1,732 \times 13,2 \times 1,4424) \times 1,65)^{\frac{1}{2}} = 12,01 \text{ ft} = 365,89 \text{ cm} \quad \text{Caso 2}$$

$$D_c = (2,65 \times (1,732 \times 13,2 \times 1,4424) \times 2,47)^{\frac{1}{2}} = 14,69 \text{ ft} = 447,67 \text{ cm} \quad \text{Caso 3}$$

$$D_c = (2,65 \times (1,732 \times 13,2 \times 1,4424) \times 5,86)^{\frac{1}{2}} = 22,63 \text{ ft} = 689,53 \text{ cm} \quad \text{Caso 4}$$

En anexo 1.3 y anexo 1.4 se encuentra todos los resultados y valores necesarios para el cálculo del ejemplo 2.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE LA ENERGÍA INCIDENTE DE UN ARCO ELÉCTRICO EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN.

En este capítulo se muestra los resultados del ejemplo 2 de los cálculos y simulaciones en NEPLAN, de la energía incidente de un arco eléctrico, la categoría de protección personal seleccionada y la distancia frontera de relámpago de arco. También se menciona los aspectos más relevantes e importantes que se debe tener en cuenta para estos.

4.1 RESULTADOS DEL EJEMPLO 2

Se realizó el mismo procedimiento para los casos 2,3 y 4. De esta forma se compararon los resultados en la Tabla 4.1 de los cálculos teóricos y la simulación para los dos métodos el de la NFPA 70E y la IEEE 1584.

Tabla 4.1. Resultados de la energía incidente ejemplo 2.

Casos	IEEE 1584 – 2002 [J/cm^2]		NFPA 70E [J/cm^2]	
	Cálculo	Simulación	Cálculo	Simulación
1	4,654	4,654	34,452	34,369
2	10,970	10,970	81,208	81,012
3	16,422	16,422	121,565	121,273
4	38,960	38,960	288,410	287,715

Es visible la diferencia en los resultados entre el método de la IEEE 1584 y la NFPA 70E observando la Figura 4.1, según la bibliografía consultada como por ejemplo en la Tabla 2.4 o en la revista CIER número 60 “Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía” [14]. Se esperaba una diferencia entre los valores obtenidos de energía incidente, debido que las ecuaciones utilizadas en el método de la IEEE 1584 son más complejas y requieren mayor cantidad de información del sistema analizado. Además, están respaldadas por múltiples pruebas de laboratorio que las validan. Por otro lado al tener una idea de la discrepancia de los resultados entre los dos métodos, no se esperaba que el resultado del ejemplo 2 presentara en esta medida tal desigualdad.

En consecuencia, se efectúan las siguientes preguntas. ¿Cuál de los dos métodos es el mejor o el más apropiado? ¿Cuál de los dos métodos debería usar?, lastimosamente estas respuestas no se pueden responder en este documento debido que no está al alcance de este. Lo más pertinente seria realizar pruebas de

laboratorio para recrear el evento de arco eléctrico del ejemplo 2, de esta forma validar alguno de los dos métodos y poder responder estos cuestionamientos.

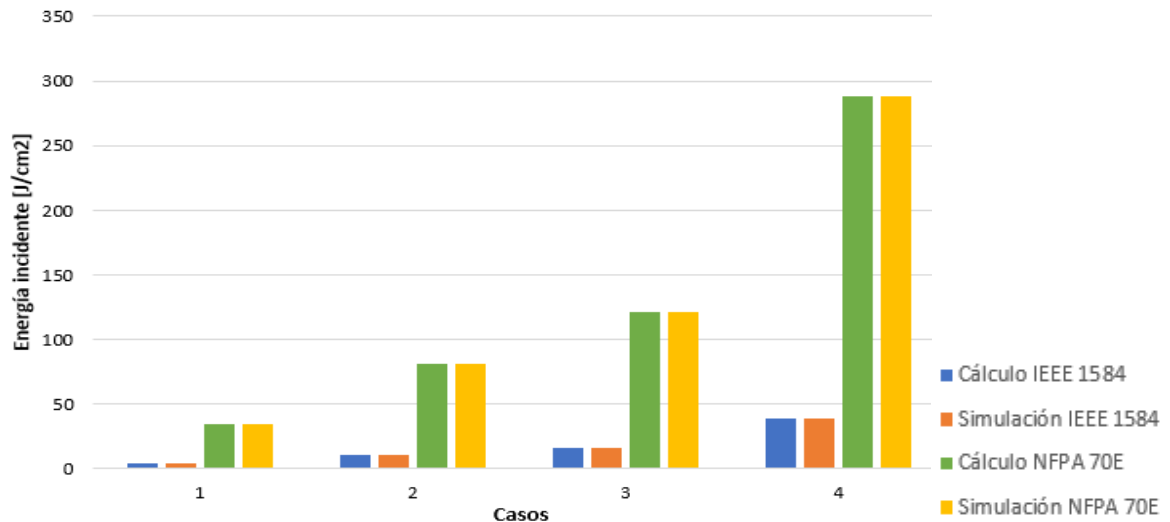


Figura 4.1. Resultado energía incidente entre métodos.

Con los valores de energía incidente se puede seleccionar la categoría de protección personal descritos en la Tabla 1.6, es importante mencionar que la categoría 0 ya no se encuentra en la NFPA 70E pero el programa NEPLAN lo tiene en consideración. La categoría de PPE es la siguiente:

Tabla 4.2. Resultados categoría de protección personal ejemplo 2.

Casos	Categoría IEEE 1584 – 2002		Categoría NFPA 70E	
	Cálculo	Simulación	Cálculo	Simulación
1	No necesita	0	3	3
2	1	1	3	3
3	1	1	4	4
4	3	3	Sin categoría No permitido	Sin categoría No permitido

Como la categoría de protección personal depende de la energía incidente, también se nota la diferencia. Al instante, surgen preguntas como ¿Qué categoría de protección personal debo seleccionar? ¿En qué me puede afectar seleccionar un método o el otro?, la primera preguntase podría responder basados en que las ecuaciones de la IEEE 1584 están respaldadas por múltiples pruebas de laboratorio, no obstante sería interesante realizar las pruebas para este ejemplo o uno similar. En la segunda pregunta seleccionar un método puede afectar en los costos del equipo de protección personal, en la comodidad y movilidad del trabajador.

Otro parámetro importante que se obtuvo al realizar los cálculos teóricos y la simulación en NEPLAN con las dos normas es la distancia frontera de relámpago de arco, que indica la distancia desde la fuente del arco a la persona y que resulta en una quemadura de segundo grado.

Tabla 4.3. Resultados distancia frontera de relámpago de arco ejemplo 2.

Casos	IEEE 1584 – 2002 [cm]		Categoría NFPA 70E [cm]	
	Cálculo	Simulación	Cálculo	Simulación
1	84,53	84,53	238,32	238,58
2	204,06	204,05	365,89	366,30
3	308,90	308,90	447,67	448,16
4	750,65	750,63	689,53	690,30

La diferencia es notoria entre los dos métodos y se puede observar mejor en la Figura 4.2. De inmediato surgirían preguntas parecidas a las que se hicieron en la energía incidente, pero existe algo más inquietante, si hay tanta diferencia entre estos métodos ¿porque preocuparse en ser tan rigurosos calculando por ejemplo la corriente de cortocircuito trifásico del sistema analizado o el tiempo del arco?, debe haber un método que está más alejado de la realidad, seguramente para simplificar procedimientos y cálculos, no obstante en mi opinión se debe ser riguroso y tratar de acercarse lo más posible a la realidad.

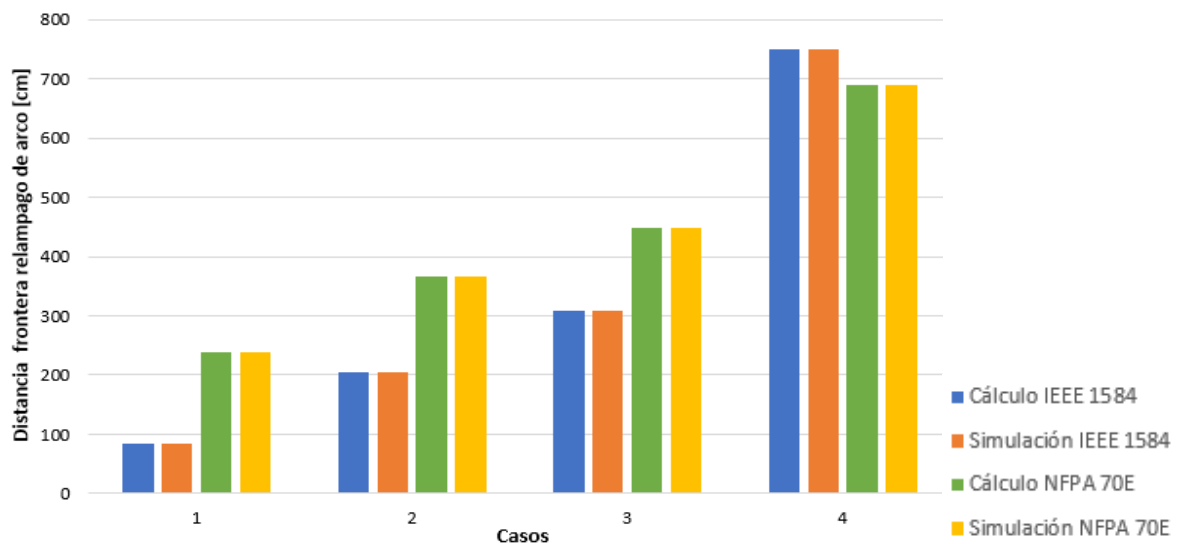


Figura 4.2. Resultado distancia frontera entre métodos.

4.2 CONCLUSIONES

En la actualidad en el sector eléctrico colombiano la seguridad de las personas y de los equipos eléctricos son de gran importancia por su valor y costo, el arco eléctrico es uno de los factores más comunes de riesgo en una instalación eléctrica por esta razón estimar la energía incidente producida por un arco eléctrico en las zonas de interés es de gran importancia. Debido que el arco eléctrico es un fenómeno complejo ya que no es constante en el tiempo se invierten una gran cantidad de recursos para su estudio, comprensión y la protección.

Se Identificó los posibles métodos y limitaciones expuestos en las normas NFPA 70E e IEEE 1584 para estimar la energía incidente de un arco eléctrico, además se investigó las variables más influyentes en el momento de presentarse un arco eléctrico, también se estudió otros aspectos relevantes como las fronteras de aproximación y generalidades de los equipos de protección personal. El documento sirve de guía para calcular la energía incidente con la herramienta de simulación NEPLAN.

En cuanto al análisis de riesgo por arco eléctrico se observó que se debe tener con anterioridad información del sistema y no siempre se puede contar con esta. Principalmente se debe contar con el diagrama unifilar del sistema, los modos de funcionamiento del sistema, las características del dispositivo de protección o estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones que determinan el tiempo de arco y la corriente de falla trifásica.

Se realizó dos ejemplos el primero de ellos con el fin de mostrar el cálculo de la energía incidente en baja tensión debido que en este rango es donde más los empleados realizan su trabajo. El segundo es un ejemplo más elaborado donde se muestra el proceso y guía del cálculo teórico y de la implementación en la herramienta NEPLAN basados en un estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones, por esta razón se debe tener una noción básica en esta área.

Se encontró que los cálculos teóricos y los simulados con la herramienta NEPLAN son similares tanto para el método de la IEEE 1584-2002 como para el de NFPA 70E-2015. Además, se notó que los valores encontrados de la energía incidente, de la categoría de protección personal y la distancia frontera de relámpago de arco con la NFPA 70E difieren respecto al método de la IEEE 1584.

El alcance del trabajo de grado no permite determinar que método es el más apropiado, si el de la IEEE 1584 o el de la NFPA 70E. No obstante en mi opinión optaría por el de la IEEE 1584 debido que este es mucho más riguroso, requiere de mayor información del sistema, procedimientos y tiene en cuenta más variables. Además, está respaldado por múltiples pruebas de laboratorio.

La naturaleza del arco eléctrico depende de muchos factores y variables como la separación de los conductores, la tensión del sistema, el medio de propagación y la corriente de falla trifásica, entre otras. Pero se notó que la más importante al momento de estimar la energía incidente es el tiempo de arco eléctrico debido que no siempre se cuenta con esta información y obtenerlo puede llevar cierto tiempo y experticia.

4.3 IDEAS DE FUTUROS TRABAJOS

Una gran idea para un futuro trabajo de grado es investigar y en lo posible realizar las pruebas de laboratorio para verificar las ecuaciones y simulaciones de la energía incidente. Por otro lado, se podría realizar el estudio de arco eléctrico a la subestación de la Universidad del Valle.

Con la actual información que existe se podría investigar los métodos para determinar la capacidad de los materiales de los equipos de protección personal y si es viable desarrollar las pruebas que se realizan para determinar la energía incidente que el material de la ropa puede soportar.

Actualmente los programas que realizan el cálculo de la energía incidente, categoría de protección y distancia frontera de relámpago de arco tienen un costo elevado, debido que realizan otros cálculos (flujo de carga y cortocircuito entre otros) se propone realizar un software de menor precio que calcule solo los parámetros del arco eléctrico con los métodos más usados.

A partir de este trabajo realizar e implementar una guía de laboratorio, con el fin de enseñar a los estudiantes las características más importantes del fenómeno del arco eléctrico. Esta puede tener una primera parte los aspectos teóricos más relevantes del arco y una segunda parte de simulación.

Un futuro trabajo que se puede realizar es analizar, describir y desarrollar las diferentes metodologías para el cálculo de la energía incidente del arco eléctrico en corriente directa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Gammon, W. J. Lee, Z. Zhang, and J. Ben C, “‘Arc Flash’ Hazards, Incident Energy, PPE Ratings, and Thermal Burn Injury - A Deeper Look,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4275–4283, 2015.
- [2] J. C. Das and A. T. Studies, “Protection Planning and System Design to Reduce Arc Flash Incident Energy in a Multi-Voltage-Level Distribution System to 8 cal / cm² (HRC 2) or Less — Part I: Methodology,” vol. 47, no. 1, pp. 398–407, 2011.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, “REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE),” p. 127, 2013.
- [4] V. Babrauskas, “Electric arc explosions — A review,” vol. 89, no. February, pp. 7–15, 2017.
- [5] “NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace 2015 Edition,” *Natl. Fire Prot. Assoc.*
- [6] E. P. Wiechmann, A. S. Morales, C. I. Llanos, R. J. Zulueta, and P. Aqueveque, “Reducing Arc Flash Hazard/Risk Category (HRC) in Mining Shovels based on Standard NFPA-70E,” *Dep. Electr. Eng. Univ. conception, Chile*, pp. 1–8, 2013.
- [7] L. Kumpulainen, G. A. Hussain, M. Rival, M. Lehtonen, and K. Kauhaniemi, “Aspects of arc-flash protection and prediction,” vol. 116, pp. 77–86, 2014.
- [8] F. RAVEL, P. AMMERMAN, and J. P. NELSON, “ELECTRICAL ARCING PHENOMENA A historical perspective and comparative study of the standards IEEE 1584 and NFPA 70E,” 2009.
- [9] K. Keller, “ELECTRICAL SAFETY CODE MANUAL A plan language guide to national electric code, OSHA and NFPA 70E,” *ELSEVIER*, pp. 143–170, 2010.
- [10] P. Gill and S. Falder, “Early management of paediatric burn injuries,” *Paediatr. Child Health (Oxford)*, pp. 406–414, 2017.
- [11] “IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations,” *Committee, Pet. Chem. Ind. Am. Natl. Stand. Inst.*, vol. 2002, no. April, 2003.
- [12] M. A. LOPEZ, “ESTUDIO DE RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA PLANTA FORD MOTOR DE VENEZUELA, S.A,” 2006.
- [13] D. Mera and J. Mosquera, “GUÍA DIDÁCTICA DE EJEMPLOS IMPLEMENTADOS EN NEPLAN PARA LA ENSEÑANZA DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS,” pp. 1–153, 2013.
- [14] F. (INTERCONEXIÓN E. S. A. Ramirez and F. (INTERCONEXIÓN E. S. A. Rivas, “Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía,” pp. 57–69, 2011.

ANEXO 1.1. Fronteras de aproximación a partes energizadas para la protección contra choques.

Rango de tensión del sistema, Fase a fase	Frontera de aproximación limitada conductor móvil expuesto [m]	Frontera de aproximación limitada Parte del circuito fijo expuesto [m]	Frontera de aproximación restringida
<50 V	No especificado	No especificado	No especificado
50 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto
301 V – 750 V	3,0	1,0	0,3
751 V – 15 kV	3,0	1,5	0,7
15,1 kV – 36 kV	3,0	1,8	0,8
36,1 kV – 46 kV	3,0	2,5	0,8
46,1 kV – 72,5 kV	3,0	2,5	1,0
72,6 kV – 121 kV	3,3	2,5	1,0
138 kV- 145 kV	3,4	3,0	1,2
161 kV – 169 kV	3,6	3,6	1,3
230 kV – 242 kV	4,0	4,0	1,7
345 kV – 362 kV	4,7	4,7	2,8
500 kV – 550 kV	5,8	5,8	3,6
765 kV- 800 kV	7,2	7,2	4,9

ANEXO 1.2. Resultados ejemplo 1.

Tensión nominal [kV]	Corriente de arco [kA]	Corriente de cortocircuito trifásico [kA]	Separación entre conductores [mm]	K	K1	K2	Energía incidente normalizada	Tiempo de arco [s]	Distancia del punto de arco a la persona [mm]	Factor de distancia	Cf	Energía incidente [J/cm²]	Energía incidente [Cal/cm²]	Limite de protección [mm]
0,48	11,0510	19,6448	32	-0,097	-0,555	0	4,0562	0,015	610	1,473	1,5	1,9092	0,4563	317,3090
0,48	10,7517	19,0077	32	-0,097	-0,555	0	3,9376	0,015	610	1,473	1,5	1,8534	0,4430	310,9783
0,48	9,3380	15,1255	25	-0,097	-0,555	0	3,3216	0,025	455	1,641	1,5	4,2157	1,0076	410,0667
0,48	7,6604	11,9958	25	-0,097	-0,555	0	2,6815	0,025	455	1,641	1,5	3,4033	0,8134	359,9150
0,48	10,4458	18,3604	32	-0,097	-0,555	0	3,8166	0,015	610	1,473	1,5	1,7965	0,4294	304,4612
0,48	4,7299	6,8217	25	-0,097	-0,555	0	1,5923	0,025	455	1,641	1,5	2,0209	0,4830	261,9738
0,48	11,2004	19,964	32	-0,097	-0,555	0	4,1155	0,095	610	1,473	1,5	12,2687	2,9323	1121,9636
0,48	7,0727	11,4963	32	-0,097	-0,555	0	2,5038	0,015	610	1,473	1,5	1,1785	0,2817	228,6885
0,48	4,5151	6,4605	25	-0,097	-0,555	0	1,5142	0,025	455	1,641	1,5	1,9218	0,4593	254,0755
0,48	10,3440	18,1458	32	-0,097	-0,555	0	3,7764	0,015	610	1,473	1,5	1,7776	0,4249	302,2809
0,48	10,0360	17,499	32	-0,097	-0,555	0	3,6550	0,015	610	1,473	1,5	1,7204	0,4112	295,6482
0,48	3,4417	4,7017	25	-0,097	-0,555	0	1,1292	0,025	455	1,641	1,5	1,4331	0,3425	212,4720
0,48	9,7573	16,9172	32	-0,097	-0,555	0	3,5454	0,015	610	1,473	1,5	1,6688	0,3989	289,6001
0,48	10,9080	19,34	32	-0,097	-0,555	0	3,9995	0,05	610	1,473	1,5	6,2752	1,4998	711,7156
0,48	3,8473	5,5347	32	-0,097	-0,555	0	1,2964	0,05	610	1,473	1,5	2,0341	0,4862	331,2539
0,48	11,7614	21,1704	32	-0,097	-0,555	0	4,3388	0,095	610	1,473	1,5	12,9343	3,0914	1162,9339
0,48	6,9596	10,7214	25	-0,097	-0,555	0	2,4173	0,025	455	1,641	1,5	3,0680	0,7333	337,8718
0,48	7,9035	13,1361	32	-0,097	-0,555	0	2,8232	0,015	610	1,473	1,5	1,3289	0,3176	248,1090
0,48	8,9386	15,2278	32	-0,097	-0,555	0	3,2250	0,015	610	1,473	1,5	1,5180	0,3628	271,5618
0,48	12,2580	22,248	32	-0,097	-0,555	0	4,5371	0,015	610	1,473	1,5	2,1356	0,5104	342,3875
0,48	11,8499	21,3618	32	-0,097	-0,555	0	4,3741	0,015	610	1,473	1,5	2,0589	0,4921	333,9850
0,48	7,2000	11,1563	25	-0,097	-0,555	0	2,5077	0,025	455	1,641	1,5	3,1827	0,7607	345,5169
0,48	5,1537	7,5426	25	-0,097	-0,555	0	1,7470	0,025	455	1,641	1,5	2,2173	0,5300	277,2096
0,48	4,7130	6,7933	25	-0,097	-0,555	0	1,5861	0,025	455	1,641	1,5	2,0131	0,4811	261,3595
0,48	12,6378	23,0782	32	-0,097	-0,555	0	4,6893	0,015	610	1,473	1,5	2,2072	0,5276	350,1417
0,48	8,4890	14,3129	32	-0,097	-0,555	0	3,0500	0,015	610	1,473	1,5	1,4356	0,3431	261,4685
0,48	12,2111	22,146	32	-0,097	-0,555	0	4,5184	0,015	610	1,473	1,5	2,1268	0,5083	341,4271
0,48	12,2644	22,2621	32	-0,097	-0,555	0	4,5397	0,05	610	1,473	1,5	7,1228	1,7024	775,6422
0,48	18,7453	37,048	32	-0,097	-0,555	0	7,1812	0,05	610	1,473	1,5	11,2673	2,6930	1058,9497
0,48	18,4845	36,4299	32	-0,097	-0,555	0	7,0732	0,05	610	1,473	1,5	11,0979	2,6525	1048,1148
0,48	2,5490	3,3082	25	-0,097	-0,555	0	0,8162	0,025	455	1,641	1,5	1,0359	0,2476	174,3395
0,48	3,2202	4,3494	25	-0,097	-0,555	0	1,0508	0,025	455	1,641	1,5	1,3336	0,3188	203,3610

ANEXO 1.3. Resultados ejemplo 2 con IEEE 1584.

Tensión nominal [kV]	Corriente de arco [kA]	Corriente cortocircuito trifásico [kA]	Separación entre conductores [mm]	K1	K2	Energía incidente normalizada	Tiempo de arco [s]	Distancia del punto de arco a la persona [mm]	Factor de distancia	Cf	Energía incidente [J/cm ²]	Energía incidente [Cal/cm ²]	Limite de protección [mm]	Limite de protección [cm]
13,2	1,4424	1,438	152	-0,555	-0,113	0,4690	0,700	910	0,973	1	4,6540	1,1123	845,3358	84,53
13,2	1,4424	1,438	152	-0,555	-0,113	0,4690	1,65	910	0,973	1	10,9700	2,6219	2040,5564	204,06
13,2	1,4424	1,438	152	-0,555	-0,113	0,4690	2,47	910	0,973	1	16,4218	3,9250	3089,0408	308,90
13,2	1,4424	1,438	152	-0,555	-0,113	0,4690	5,86	910	0,973	1	38,9603	9,3119	7506,4713	750,65

ANEXO 1.4. Resultados ejemplo 2 con NFPA 70E.

Amperios simétricos de cortocircuito [A]	Amperios simétricos de cortocircuito [kA]	tensión fase a fase del sistema [V]	tensión fase a fase del sistema [kV]	Potencia nom. transformador [MVA]	Impedancia transformador [%]	Potencia en un arco trifásico [MVA]	Distancia de la frontera de arco [pies]	Distancia de la frontera de arco [cm]	Tiempo de arco eléctrico [s]	D [mm]	D [pulgadas]	I trifásico	Energía incidente [J/cm ²]	Energía incidente [Cal/cm ²]
3827,2447	3,8272	13200	13,2	5,25	6	43,7368	7,82	238,32	0,7	910	35,8268	1,4424	34,4517	8,2343
3827,2447	3,8272	13200	13,2	5,25	6	43,7368	12,01	365,89	1,65	910	35,8268	1,4424	81,2075	19,4094
3827,2447	3,8272	13200	13,2	5,25	6	43,7368	14,69	447,67	2,47	910	35,8268	1,4424	121,5652	29,0553
3827,2447	3,8272	13200	13,2	5,25	6	43,7368	22,63	689,53	5,86	910	35,8268	1,4424	288,4097	68,9328

ANEXO 1.5. Resultados ejemplo 2 con NFPA 70E.

Se realizó un ejemplo de etiqueta para el caso 2 del ejemplo 2, debido que es un requisito para todos los equipos eléctricos que tengan peligro de arco. La etiqueta debe contener el nivel de energía incidente, la categoría de protección personal y la distancia frontera contra relámpago de arco.



PELIGRO

RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

Categoría de riesgo contra arco eléctrico	1
Energía incidente del arco eléctrico	3,925 Cal/cm2
Distancia límite de aproximación que una persona puede tener una quemadura de segundo grado por arco eléctrico	308,90 cm
Tensión de operación [kV]	13,2
Corriente de cortocircuito [kA]	1,438
Equipo	
EPP mínimo grado de arco 4 Cal/cm2: Ropa interior de algodón + Camisa resistente al fuego + pantalones resistentes al fuego u overol resistente al fuego + carete o capucha del traje de arco eléctrico y pasamontañas + chaqueta resistente al fuego + casco dieléctrico + protección oídos + botas dieléctricas	