



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

TESIS DE MAESTRÍA

MARCO COMPARATIVO ENTRE LA NORMA IEEE 1584 Y LA NORMA NFPA 70E

Paola Andrea Loaiza Morales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2018

MARCO COMPARATIVO ENTRE LA NORMA IEEE 1584 Y LA NORMA NFPA 70E

Paola Andrea Loaiza Morales

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata

Grupo de Investigación

Redes de Distribución y Potencia “GREDyP”

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura,

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2018

COMPARATIVE FRAMEWORK BETWEEN THE STANDARD IEEE 1584 AND THE STANDARD NFPA 70E

Paola Andrea Loaiza Morales

A thesis presented for the degree of:
Master in Electrical Engineering

Supervisor:

Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata

Research group:

Power Lines Distribution and Power System “GREDyP”

Universidad Nacional de Colombia

Faculty of Engineering and Architecture,

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering

Manizales, Colombia

2018

Dedico este trabajo a Dios,

A mis padres Liliana y Olmedo,

A mi hermana Leidy,

Y a mi amiga incondicional Miryam.

Paola Andrea

AGRADECIMIENTOS

A GRADEZCO a Dios por permitirme cumplir esta meta. A las personas que contribuyeron a través de sus consejos, ánimos, compañía y sermones en los momentos de crisis, me gustaría dar las gracias en estos momentos de felicidad.

Al Dr. Eduardo Antonio Cano Plata, la persona que me incentivó a iniciar con este proyecto aportando nuevas enseñanzas en mi vida profesional y a pesar de mi testarudez no perdió la confianza de verme graduada.

A mi familia siempre incondicional, apoyándome a través de su compañía y entendiéndome en los instantes en donde no tenían la mía.

A mi mejor amiga por no dejarme desfallecer en los momentos más difíciles, esos regaños con un toque de cariño, impulsaban en mí la fuerza necesaria para continuar.

A Oscar Soto, un gran amigo y compañero el cual aportó a través de sus consejos el desarrollo de este trabajo.

Para finalizar solo me quedan palabras de agradecimiento a la Universidad Nacional y a todos las personas del departamento, en especial al profesor Cesar Arango por su apoyo incondicional durante todos estos años.

RESUMEN

LA tesis presenta un análisis acerca de la importancia del cálculo del arco eléctrico para proteger la vida de las personas que interactúan con la energía eléctrica. Con base a dicha revisión, en el estado del arte, se realiza un estudio comparativo entre las definiciones y ecuaciones que utilizan la norma NFPA70E y la norma IEEE1584, para calcular la energía incidente. Se presenta el impacto del arco eléctrico entendido desde el fenómeno físico, siguiendo con un comparativo de los fundamentos matemáticos, en donde se calcula la energía incidente a partir de los métodos planteados en las normas relacionadas, teniendo como resultado las diferencias que tiene cada norma dependiendo del sistema analizado.

En segunda instancia, se ha diseñado un programa el cual permite calcular la energía incidente y el equipo de protección personal (EPP) que debe utilizar la persona al momento de interactuar con los equipos eléctricos. Dicho programa, permite al usuario realizar la comparación en tiempo real de ambas normas, por tanto, genera la opción de escoger que norma se adecua más según su análisis, de acuerdo, a las ventajas y desventajas presentadas en cada uno de los capítulos de este documento, para identificar así que norma se debe utilizar de acuerdo al sistema analizado.

Palabras claves: NFPA 70E, IEEE 1584, arco eléctrico, energía incidente, riesgo eléctrico, distancias de trabajo, distancias de seguridad, equipo de protección personal.

ABSTRACT

THE thesis presents an analysis about the importance of calculating the electric arc to protect the life of people who interact with electric power. Based on this review, in the state of the art, a comparative study is made between the definitions and equations that use the NFPA70E standard and the IEEE1584 standard, to calculate the incident energy. The impact of the electric arc understood from the physical phenomenon is presented, following with a comparison of the mathematical foundations, where the incident energy is calculated from the proposed methods in the related standards, having as a result the differences that each norm has depending on of the analyzed system.

In the second instance, a program has been designed which allows calculating the incident energy and personal protective equipment (PPE) that the person must use when is interacting with electrical equipment. This program allows the user to perform the real-time comparison of both standards, therefore, it generates the option to choose which standard is best suited according to the analysis, regarding to the advantages and disadvantages presented in each of the chapters of this document, to identify which standard should be used according to the system analyzed.

Keywords: NFPA 70E, IEEE 1584, arc flash, incident energy, electrical hazard, boundary arc flash, personal protective equipment.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Definiciones.....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Hipótesis de solución.....	6
1.4 Objetivos del presente trabajo.....	7
1.5 Estado del arte.....	8
1.6 Estructura del documento.....	11
1.7 Resumen.....	12
CAPÍTULO 2	13
2. CONCEPTUALIZACIÓN MATEMÁTICA.....	14
2.1 Requisitos generales para el cálculo de la energía incidente.....	14
2.2 Ecuaciones para el cálculo de la energía incidente con la norma NFPA 70E....	21
2.3 Ecuaciones para el cálculo de la energía incidente con la norma IEEE 1584...	22
2.4 Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma NFPA 70E	24
2.5 Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma IEEE 1584	25
2.6 Resumen.....	26
CAPÍTULO 3	28
3. CONCEPTUALIZACIÓN FÍSICA	29
3.1 Origen del arco eléctrico.....	29
3.2 Factores que generan el arco eléctrico.....	31
3.3 Consecuencias del arco eléctrico.....	33
3.4 Resumen.....	34
CAPÍTULO 4.....	36
4. APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA.....	37
4.1 Fuente del arco.....	38

4.2	Canal.....	44
4.3	Protección del usuario.....	47
4.4	Resumen.....	54
CAPÍTULO 5.....		56
5. EJERCICIO DE APLICACIÓN		57
5.1	Caso de estudio.....	57
5.2	Objetivo del caso de estudio.....	59
5.3	Desarrollo del caso de estudio en BT.....	60
5.4	Desarrollo del caso de estudio en MT.....	65
5.5	Resumen.....	67
CAPÍTULO 6.....		68
6.MARCO COMPARATIVO ENTRE EL PROGRAMA SARE Y EL PROGRAMA ETAP		69
6.1	Funcionamiento del programa SARE.....	69
6.2	Comparación del programa ETAP con el programa SARE.....	78
6.3	Resumen.....	84
CAPÍTULO 7.....		85
7. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....		86
7.1	Conclusiones generales.....	86
7.2	Aportes.....	89
7.3	Futuros desarrollos.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Antecedentes y evolución para el cálculo de la energía incidente.	10
Figura 2a. Conductores al aire libre	16
Figura 3 Límites de proximidad según la NFPA 70E	19
Figura 4 Ionización de los átomos	30
Figura 5 Conformación de la columna de plasma.....	30
Figura 6 Métodos para disminuir o eliminar el riesgo por arco eléctrico.....	37
Figura 7 Componente subtransitoria	38
Figura 8 Componente transitoria	39
Figura 9 Componentes permanente	39
Figura 10 Componente de corriente continua.....	39
Figura 11 Componentes de la corriente de cortocircuito, Cuadernillo Técnico N° 158 de Schneider Electric.....	40
Figura 12 Distancias de seguridad, adaptado del Artículo. 13.4 del RETIE 2013.	47
Figura 13 Equipo de protección personal categoría 1	49
Figura 14 Equipo de protección personal categoría 2.....	50
Figura 15 Equipo de protección personal categoría 3.....	51
Figura 16 Equipo de protección personal categoría 4.....	52
Figura 17 Diagrama unifilar del caso de estudio.....	58
Figura 18 Sistema radial simple implementado en el software ETAP	60
Figura 19 Resultados primer escenario.....	62
Figura 20 Resultados segundo escenario.....	63
Figura 21 Resultados tercer escenario.....	64
Figura 22 Resultados cuarto escenario	65

Figura 23 Cálculo de la energía incidente variando diferentes tensiones en la barra de MT.	66
Figura 24 (a) Circuito definido en el programa SARE.....	70
Figura 25 Diagrama unifilar del funcionamiento del programa SARE.	71
Figura 26 Campo utilizado para ingresar los datos generales del sistema.....	72
Figura 27 Campo utilizado para ingresar los datos de las líneas.....	72
Figura 28 Campo utilizado para ingresar los datos del arco eléctrico.....	73
Figura 29 Resultados de la energía incidente con la norma NFPA 70E.	74
Figura 30 Etiqueta con la norma NFPA70E.	75
Figura 31 Etiqueta – Categoría 1.....	76
Figura 32 Interfaz completa del programa SARE.	77
Figura 33 Circuito radial simple implementado en el programa ETAP.....	78
Figura 34 Corriente de cortocircuito calculada con el programa SARE.	80
Figura 35 Corriente de arco calculada con el programa SARE.	81
Figura 36 Energía incidente calculada con el programa SARE.	82
Figura 37 Etiqueta del programa SARE.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Restricciones para el cálculo de la energía incidente	14
Tabla 2 Requisitos para el cálculo de la energía incidente	15
Tabla 3 Distancia típica entre conductores (tomado de la Tabla 4 de la norma IEEE 1584)	17
Tabla 4 Distancia factor x (tomado de la Tabla 2 de la norma IEEE 1584)	17
Tabla 5 Distancias típicas de trabajo (Anexo D NFPA 70E, Tabla 3 de la norma IEEE 1584).....	18
Tabla 6 Resumen Tabla 130.7(C)(16) de la NFPA 70E	20
Tabla 7 Tiempo de despeje de la falla (Anexo D NFPA 70E, Tabla 1 IEEE 1584).....	41
Tabla 8 Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente alterna (tomado de la Tabla 13.7 RETIE)	45
Tabla 9 Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente continua (Tabla 13.8 RETIE).....	46
Tabla 10 Equipo de protección personal Tabla 13.6 del RETIE 2013.	48
Tabla 11 Escenarios a evaluar en BT	61
Tabla 12 Escenarios a evaluar en MT	65
Tabla 13 Escenarios de simulación para la comparación del programa ETAP y el programa SARE.	79

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo plantea la hipótesis objeto de este estudio, la justificación, los objetivos con los que se pretende dar cumplimiento a la justificación de la tesis y por último el estado del arte donde se presenta los antecedentes para calcular el nivel de riesgo por arco eléctrico. Al final de este capítulo, se da a conocer la estructura general del documento.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria está directamente relacionado con el progreso de la energía eléctrica, ya que es considerada como uno de los pioneros económicos y sociales más trascendentales en el mundo, actualmente se observa que estamos diariamente en contacto con la energía eléctrica, ya sea a bajos niveles de tensión a través de un tomacorriente o a altos niveles de tensión a través de una subestación.

Una de las mayores preocupaciones del sector eléctrico en Colombia y en el mundo, se debe al número de lesiones o muertes por año ocasionados al manipular la energía eléctrica, durante los últimos años se ha intentado disminuir las estadísticas a través de la implementación de reglamentos y mediante avances tecnológicos, sin embargo, no ha sido posible disminuir o eliminar las pérdidas de vidas humanas al momento de realizar dichos trabajos. En un principio, se tenía la concepción de que el origen de las quemaduras eléctricas se debían al paso de la corriente a través del cuerpo, pero en el año de 1982 Ralph Lee [1] [2], desarrolló un modelo teórico relacionado con las quemaduras del cuerpo humano causadas por un arco eléctrico, estableciendo que al determinar el valor de la energía producida por un arco eléctrico (*energía incidente*), se puede estimar una distancia segura a la fuente del arco, disminuyendo en un gran porcentaje las consecuencias de las quemaduras [3][4].

En el año de 1896, se creó la National Fire Protection Association (NFPA 70E), siendo el organismo americano encargado de realizar las normas para la prevenir y disminuir los riesgos en los lugares de trabajo. En su edición del año de 1995, incluyó el arco eléctrico como riesgo eléctrico, exigiendo a las empresas calcular la energía incidente y la distancia de trabajo segura, dicho análisis se debía realizar con base en los estudios realizados por el autor Ralph Lee; en la versión actual de la NFPA70E siendo la 2015 [5][5], dichos cálculos se deben realizar con base en los estudios realizados por el autor

Ralph Lee y los autores Doughty, Neal y Floyd [6]. Por otra parte, en el año 1963, se creó el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y al observar que las ecuaciones elaboradas por Ralph Lee no tenían en cuenta algunos parámetros que permitían disminuir la energía incidente, en el año 2002, elaboró la guía IEEE 1584 -2002 Guide for performing arc-flash hazard calculations [7].

Actualmente en Colombia, para disminuir el riesgo eléctrico en las instalaciones se debe cumplir con el Reglamento de Instalaciones Eléctricas (RETIE), siendo su versión actual la 2013 [8]. En su artículo 13.4 para disminuir el riesgo debido al arco eléctrico, establece las distancias mínimas para los trabajos en los equipos con partes energizadas, dentro del cual hace referencia a la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584, dando a conocer los dos métodos para determinar el valor de la energía incidente, sin embargo, se debe tener en cuenta que ambas normas utilizan diferentes métodos y por tanto deben considerarse diferentes características del sistema a evaluar.

1.1 Definiciones

Análisis de riesgo de arco eléctrico: Método utilizado para determinar el riesgo presente en una persona al momento de estar expuesto a la energía incidente generado por un arco eléctrico. [7]

Arco al aire libre: Arco eléctrico que se produce al aire libre sin ningún tipo de encerramiento.

Arco eléctrico: Es el término aplicado al paso de corrientes eléctricas sustanciales a través de un material aislante, implicando en los terminales del arco temperaturas alrededor de los 20000°K (35000 °F) [1].

Arco encapsulado: Arco eléctrico que se produce dentro de un encerramiento, aislando por completo los electrodos donde se puede generar el arco eléctrico.

Corriente de falla: Corriente que fluye de un conductor a tierra o a otro conductor debido a una conexión anormal (incluyendo un arco) entre los dos [7].

Corriente de falla de arco: Corriente que fluye a través de una plasma de arco eléctrico, también llamada corriente de arco [7].

Bolted fault current: Es un cortocircuito o contacto eléctrico entre dos conductores

a diferentes potenciales, en el que la impedancia o la resistencia entre conductores es esencialmente cero [7].

Distancia de trabajo: Distancia entre el posible punto del arco y la cabeza y el cuerpo del trabajador ubicado en el lugar para realizar la tarea asignada [7].

Distancia entre conductores o electrodos: Distancia entre dos puntos que se encuentren a diferente potencial, para el caso de los tableros eléctricos son los barrajes de cobre electrolíticos que se utilizan para las partes energizadas; la distancia varía de acuerdo al nivel de tensión del tablero o equipo [7].

Energía incidente: Es la cantidad de energía térmica aplicada en una superficie, a una distancia de la fuente, generada durante un evento de arco eléctrico. Se mide en Julios por centímetro cuadrado (J/cm^2) o en calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2) [5][7].

Equipo de Protección Personal (EPP): Comprende todos los dispositivos, accesorios y vestimenta que utiliza el trabajador o cualquier persona para evitar o disminuir posibles riesgos a su alrededor.

Expuesto (partes vivas): Partes energizadas que pueden ser tocadas repentinamente por una persona directamente o mediante un objeto conductor [8].

IEEE 1584: “Institute of Electrical and Electronics Engineers”, fundado en el año de 1963, encargado de la estandarización de normas, entre otras actividades [7].

Límite de arco eléctrico: Límite desde la fuente del arco en donde una persona podría sufrir una quemadura de segundo grado. [5].

Límite de aproximación restringida: Se considera como la distancia mínima a la cual un profesional competente se puede acercar, sin llevar los EPP certificados para trabajar en lugares donde se pueda generar un arco eléctrico [5][8].

Límite de aproximación segura: Distancia mínima a la cual puede acercarse el personal no calificado a la fuente del arco sin sufrir ningún tipo de lesiones [5][8].

Límite de aproximación técnica: Se considera la distancia mínima en la cual un profesional competente puede realizar trabajos en partes energizadas, solo si porta EPP certificados contra arco eléctrico [5][8].

NFPA 70E: Organización “National Fire Protection Association” fundada en el año

de 1896 en Estados Unidos, con el fin de elaborar normas para la protección y prevención en diferentes lugares de trabajo [8].

Profesional competente: Técnico, tecnólogo o ingeniero educado en el campo de la electrotecnia, que cuente con matricula profesional vigente que lo acredite para desarrollar las actividades relacionadas [8].

Quemadura: Múltiples trastornos tisulares, causados por el contacto con llamas, electricidad o diferentes elementos de temperatura elevada [8].

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas [8].

Riesgo: Probabilidad que se produzca una pérdida de cualquier tipo al momento de realizar una actividad determinada [5][8].

Riesgo de arco eléctrico: Condición peligrosa la cual se asocia con la probabilidad de liberación de energía debida a un arco eléctrico [5].

Sistema de Puesta a tierra (SPT): Conductores continuos, los cuales se conectan de los equipos eléctricos con el terreno o un elemento metálico [8].

Tensión (nominal): Tensión con el cual se designa un sistema, equipo o instalación. Para los sistemas trifásicos, es la tensión entre fases [7].

1.2 Planteamiento del problema

¿Cuál de las dos normas se debería usar, para calcular la energía incidente en condición de arco eléctrico en Colombia?

1.3 Hipótesis de solución

En la actualidad se han incrementado los accidentes por arco eléctrico [9][10], por tanto el Ministerio de Minas y Energía estableció en el RETIE, diferentes lineamientos para las empresas del sector eléctrico y de esta manera prevenir este tipo de accidentes. En el artículo 13.4 del RETIE 2013 “*Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas*”, menciona que para actividades tales como: cambio de interruptores, intervenciones de transformadores de corriente, mantenimiento de barrajes, entre otros, se deben cumplir con ciertos requisitos, entre ellos: a) Fijar etiquetas donde se indique el nivel de riesgo y el equipo requerido, b) Usar el EPP certificados para la energía incidente calculada, c) Delimitar los límites de aproximación y d) cumplir con las distancias mínimas de aproximación a equipos energizados, para dar cumplimiento a lo anterior, se debe realizar un análisis de energía incidente ya sea con la norma NFPA 70E o la norma IEEE 1584 [8].

Ahora bien, al observar la realidad del sector eléctrico, se evidencia, que algunos de los requisitos mencionados anteriormente no se cumplen, ejemplo: muchos de los equipos eléctricos carecen de las etiquetas que indican el nivel de riesgo, no se hace el análisis de la energía incidente, los trabajadores no utilizan el EPP asignado por la empresa, sea por incomodidad, falta de movilidad o visibilidad o simplemente por falta de conciencia por parte del personal. Debido que las empresas no hacen el análisis de la energía incidente, surgieron interrogantes sobre la aplicación de dichas normas, por ello, con esta tesis se pretende dar conocer las diferencias y alcances de cada una. Este hecho conlleva a dar claridad a la industria de como calcular la energía incidente, considerando las ventajas y desventajas de cada norma. Cabe resaltar, que la energía incidente debe ser calculada adecuadamente, ya que provee la información necesaria para determinar el EPP y de esto depende la capacidad de movilidad de la persona, aumentando o disminuyendo el riesgo [5].

1.4 Objetivos del presente trabajo

A continuación se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que se plantearon para cumplir con lo propuesto en la hipótesis de solución; el presente trabajo aborda los primeros estudios del arco eléctrico, las ecuaciones y definiciones utilizadas para determinar la energía incidente.

Objetivo general

Desarrollar una metodología comparativa, que permita determinar las ventajas y desventajas relativas de la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 al calcular la energía incidente producida por el arco eléctrico.

Objetivos específicos

1. Comparar los parámetros, los fundamentos matemáticos y las ecuaciones, utilizadas por la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 para calcular la energía incidente.
2. Implementar escenarios de simulación, que permitan cuantificar y analizar la energía incidente.
3. Diseñar un algoritmo que oriente el cálculo de la energía incidente con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584.

A continuación se describen las etapas de la metodología a utilizar:

Etapa 1: Estudio y comparación de los parámetros, los fundamentos matemáticos y las ecuaciones utilizadas por cada una de las normas para determinar la energía incidente.

Etapa 2: Implementación de los escenarios de simulación para comparar la energía incidente y el EPP entre la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584.

Etapa 3: Desarrollo del algoritmo “Simulación del Arco Eléctrico - (SARE)”, para calcular el valor de la energía incidente, los límites de aproximación seguro y el EPP con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584.

Etapa 4: Comparación del programa SARE con el programa ETAP.

Etapa 5: Análisis de los resultados en cada uno de los escenarios propuestos.

Etapa 6: Restricciones encontradas en el programa SARE para futuros trabajos.

1.5 Estado del arte

Debido a las consecuencias que genera el arco eléctrico en las personas e instalaciones eléctricas, durante los últimos años se han observado avances normativos y tecnológicos con el fin, de disminuir el número de accidentes ocasionados por el arco eléctrico [3]. A continuación, se hace una descripción de los artículos que hacen parte de la normativa actual, la cual se enfoca en disminuir los niveles de la energía que incide [5][7].

NFPA 70E

Como se dijo anteriormente, en el año 1995, el arco eléctrico fue considerado por la norma NFPA 70E como un riesgo eléctrico, generando un cambio normativo y cultural en las personas que trabajan en cercanía a equipos energizados. En la versión actual de la NFPA 70E, edición 2015, la evaluación y análisis de la energía incidente del arco eléctrico se basan en conceptos teóricos, desarrollos por los autores Ralph Lee [1] y Doughty, Neal y Floyd [6].

Ralph Lee [1] en el año de 1982, identificó que el arco eléctrico, es el término aplicado al paso de corrientes eléctricas a través de un material aislante ya sea aire o gas, llegando alcanzar temperaturas alrededor de los 20.000°C o 35.000 °F. Dichas temperaturas pueden causar quemaduras fatales a una distancia de trabajo alrededor de los 5 pies (152 cm) y quemaduras considerables a una distancia aproximada de 10 pies (305 cm). A partir de estos hallazgos, Lee, estableció una relación entre el tiempo de muerte de las células del tejido humano y la temperatura producida por un arco eléctrico, conociendo de esta manera, la temperatura en donde la piel puede sufrir quemaduras considerables o mortales.

Después de la implementación de las ecuaciones de Ralph Lee, se realizaron diferentes análisis forenses de incidentes ocasionados por el arco eléctrico, indicando que las ecuaciones no permitían determinar el mayor efecto térmico del arco al ser generado en equipos encapsulados. En el artículo de *Doughty, Neal y Floyd [6]* del año 2000, se dieron a conocer diferentes pruebas realizadas a arcos eléctricos generados al aire libre y

encapsulados, estableciendo que las superficies próximas al arco intensifica la temperatura que se dirige hacia fuera de la capsulada, por tanto, el valor de la energía incidente depende del lugar donde se genere el arco, ya sea al aire libre o encapsulado; dentro del artículo se presentan nuevas ecuaciones para calcular la energía incidente y los límites de aproximación seguro dependiendo del tipo de arco sea al aire libre o encapsulados.

Hasta el año 2002, para calcular la energía incidente producida por el arco eléctrico, se debía utilizar las ecuaciones de los autores mencionados anteriormente; durante éste año, la norma IEEE 1584 desarrolla una nueva guía para el análisis de la energía incidente, presentada a continuación.

IEEE 1584

En el año 2002 la norma IEEE 1584, encontró limitaciones dentro los métodos utilizados por la norma NFPA 70E para calcular la energía incidente, ya que sus ecuaciones tienen restricciones en el nivel de tensión y no tienen en cuenta algunas características del sistema que afectan directamente el valor de la energía incidente, por tanto la norma IEEE decidió realizar nuevos métodos basados en modelos empíricos de análisis estadísticos. Para el planteamiento de las nuevas ecuaciones, el instituto integro varios estudios realizados por diferentes autores, el artículo escrito por *Tim Crnko and Steve Dyrnes* [7][12] describe las características de las pruebas que se realizaron en diferentes laboratorios de alta potencia de diferentes tipos de arcos eléctricos, los resultados fueron analizados por médicos con experiencia en quemaduras eléctricas, ingenieros con experiencia en empresas electroquímicas y fabricantes del sector eléctrico.

Los cálculos incluidos en la norma IEEE 1584 analizan arcos al aire libre y encapsulados independiente del nivel de tensión del sistema, incluye además parámetros adicionales para determinar la energía incidente y los límites de aproximación segura y un calculador en Excel que permite determinar la energía incidente de sistemas poco complejos, ya que a medida que el tamaño del sistema aumenta los errores del calculador también.

En la actualidad la norma NFPA 70E edición 2015 y la norma IEEE 1584 edición 2002 son los dos métodos utilizados para determinar la energía incidente. A continuación,

en la Figura 1 se presenta el progreso de los métodos para calcular la energía incidente y los límites de aproximación seguro a lo largo de los años.

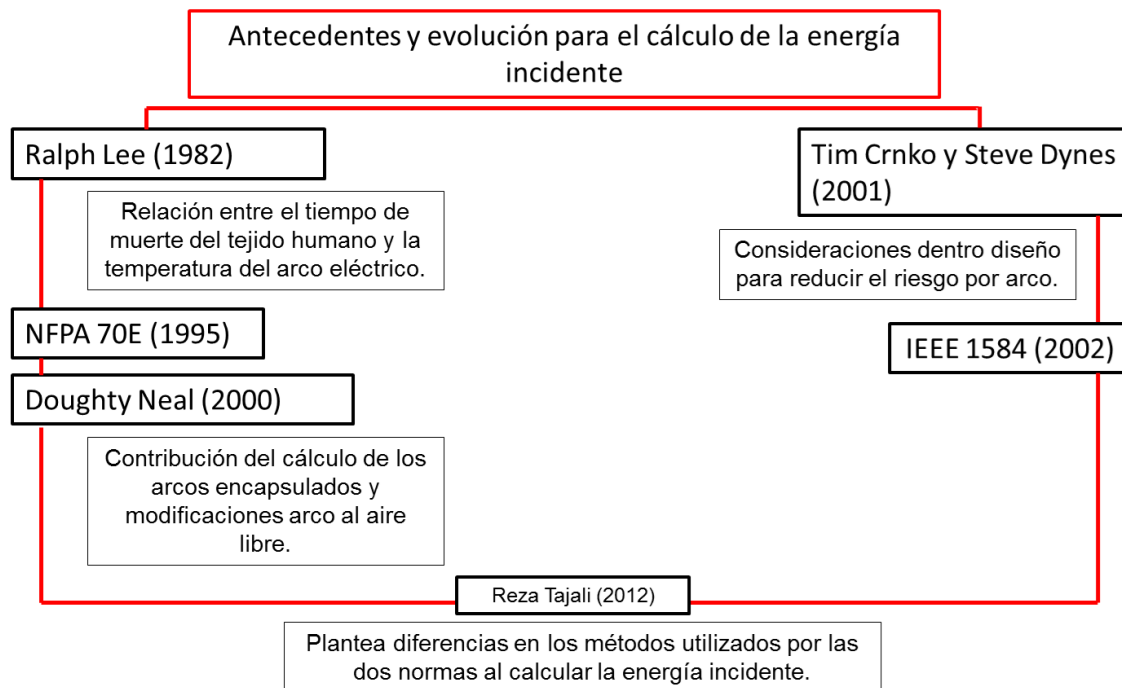


Figura 1 Antecedentes y evolución para el cálculo de la energía incidente.

El autor Reza Tajali [11] plantea diferencias considerables al momento de calcular de la energía incidente con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584, por tanto, la tesis se basa determinar las diferencias entre ambas normas.

1.6 Estructura del documento

En el **Capítulo 1**, se da a conocer la introducción de la tesis, contextualizando acerca del trabajo general de la tesis, la identificación del problema, los objetivos a alcanzar, el estado del arte y por último el orden de presentación del documento.

El **Capítulo 2**, conceptualiza los fundamentos matemáticos y las ecuaciones utilizadas por la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 para determinar la energía incidente, igualmente se conoce los alcances y las restricciones de cada norma.

En el **Capítulo 3**, se presenta el fenómeno del arco eléctrico mediante el concepto de la física, desde la formación, estados y daños que puede causar en el cuerpo humano, dependiendo del nivel de la energía incidente.

Dentro del **Capítulo 4**, se presenta la importancia del cálculo de la energía incidente en la ingeniería. Además da a conocer el avance que se ha tenido hacia la protección del arco eléctrico, para el ser humano y para los equipos.

En el **Capítulo 5**, se implementan los escenarios de simulación para determinar la energía incidente y el EPP con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 y de esta manera realizar la comparación de ambas normas en cada uno de los escenarios.

En el **Capítulo 6**, se desarrolla un algoritmo de simulación llamado SARE, el cual se compara el programa ETAP en diferentes escenarios de simulación permitiendo conocer el porcentaje de error entre ambos programas. Por último en este capítulo, se da a conocer las restricciones y limitantes del programa SARE.

El **Capítulo 7** presenta las conclusiones finales de la tesis, abriendo puertas para el desarrollo de trabajos futuros. Se incluye además, conclusiones para la mejora del programa desarrollado dentro de la tesis, el cual permite determinar el valor de la energía incidente y EPP.

1.7 Resumen

En el primer capítulo se describen los motivos del inicio del estudio del arco eléctrico y la importancia que tuvieron sus análisis a través de los años, teniendo un impacto tan significativo que se estableció mediante normativa el análisis del arco eléctrico mediante el cálculo de la energía incidente. En este capítulo se presenta un diagrama conceptual que permite observar el avance de las normas, a continuación se realiza una comparación entre la norma IEEE1584 y la norma NFPA 70E las cuales permiten realizar el análisis del arco eléctrico.

Norma NFPA 70E	Norma IEEE 1584
<p>Ralph Lee [1982] – Determinó que el arco eléctrico puede causar quemaduras fatales a una distancia de trabajo de 152 cm. Estableció una ecuación para el cálculo de la energía incidente en donde relaciona el tiempo de muerte de las células del tejido humano y la temperatura producida por un arco eléctrico .</p> <p>Doughty Neal y Floyd [2000] – Debido a diferentes análisis forenses se establecieron nuevas ecuaciones para calcular la energía incidente para arcos generados al aire libre y para arcos generados en lugares encapsulados.</p>	<p>Tim Crnko and Steve Dyrnes [2002] – Se presentaron nuevas ecuaciones para calcular la energía incidente para arcos generados al aire libre y los arcos generados en lugares encapsulados.</p>

Diferencias entre las normas

Reza Tajali [2012] – Planteo grandes diferencias en los métodos utilizados por cada norma al momento de calcular la energía incidente, lo que generó discrepancia en los resultados de la energía incidente. Debido a las grandes diferencias, en la actualidad no se tiene claridad qué norma utilizar para calcular la energía incidente, siendo un problema para la industria al momento de cumplir con el artículo 13.4 del RETIE.

CAPÍTULO 2

CONCEPTUALIZACIÓN MATEMÁTICA

Este capítulo da a conocer los fundamentos matemáticos y las ecuaciones utilizadas por la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 al momento de calcular la energía incidente y los límites de proximidad seguro, igualmente se presentan los alcances y restricciones de cada norma.

2. CONCEPTUALIZACIÓN MATEMÁTICA

PARA determinar el nivel de riesgo debido al arco eléctrico como primera medida se debe calcular la energía incidente, la cual se considera como la cantidad de energía aplicada sobre una superficie a cierta distancia de la fuente del arco. Esta energía se mide en julios por centímetro cuadrado (J/cm^2) o en calorías sobre centímetros cuadrados (cal/cm^2).

2.1 Requisitos generales para el cálculo de la energía incidente

La NFPA 70E edición 2015 en su artículo 130 “Trabajos con riesgos eléctricos”, da a conocer las prácticas de seguridad cuando no se pueda asegurar una condición de trabajo segura en cuanto a las instalaciones eléctricas, para ello, la norma exige calcular la energía incidente de acuerdo su anexo D “Métodos de cálculo de la energía incidente y límites del arco eléctrico” o mediante la norma IEEE 1584; a continuación en la Tabla 1, se dan a conocer las restricciones que tiene cada norma al calcular la energía incidente.

Tabla 1 Restricciones para el cálculo de la energía incidente

	NFPA 70E	IEEE 1584
Rango de Tensión	208 V – 600 V (Empírica) >600 V (Método Lee)	208 V– 15 kV (Empírica) >15 kV (Método Lee)
Rango corrientes de cortocircuito	16 kA – 50 kA	0,7 kA – 106 kA
Rango duración del arco	Sin límites	Sin límites
Tipo de Instalación	Al aire libre, encapsulada	Al aire libre, encapsulada, cable
Distancia de trabajo	>18 pulgadas	>18 pulgadas
Distancia entre conductores	NA	13 mm a 152 mm
Unidades	Cal/cm^2	J/cm^2

Como se observa en la Tabla 1, la norma NFPA 70E tiene un rango muy limitado respecto a las corrientes de cortocircuitos, sin embargo, no tiene limitaciones en la distancia entre los conductores del equipo a analizar, siendo el caso contrario para la norma IEEE 1584; a continuación en la Tabla 2 se presentan los requisitos exigidos por cada norma al momento de calcular la energía incidente.

Tabla 2 Requisitos para el cálculo de la energía incidente

	NFPA 70E	IEEE 1584
Corriente de cortocircuito	X	X
Tensión del sistema	X	X
Distancia entre conductores		X
Distancia factor x		X
Características del SPT		X
Tipo de Equipo (Al Aire/encapsulado)	X	X
Distancia de trabajo	X	X
Información de la protección	X	X

Se puede observar que la norma IEEE 1584 requiere datos específicos del diseño del sistema, como lo es la distancia entre conductores del equipo donde se puede generar el arco, la verificación del sistema de puesta a tierra y el factor x que depende de la tensión y característica del equipo, de esta manera se aumenta la complejidad del cálculo, pero a su vez la exactitud [5]. A continuación se da una breve explicación acerca de los requisitos exigidos por las normas al momento de determinar la energía incidente:

1) *Corriente de cortocircuito*: como primer paso al momento de calcular la energía incidente se debe calcular la corriente de cortocircuito, ya que la energía incidente es directamente proporcional al valor de la corriente de cortocircuito. Ambas normas especifican que se debe analizar un cortocircuito trifásico y simétrico, la norma NFPA 70E cita la siguiente ecuación para determinar la corriente de cortocircuito

$$I_{sc} = \frac{MVA_{base} \times 10^6}{\sqrt{3} \times V} \times \frac{100}{\%Z} \quad (1)$$

Donde,

Isc: Corriente de cortocircuito simétrica (A), **MVA_{base}:** Potencia del transformador (MVA), **V:** Tensión Nominal (V), **%Z:** Impedancia del transformador.

Mientras que la norma IEEE 1584 determina la corriente de cortocircuito mediante la norma IEEE Std 401-1993 [18], sin embargo, ninguna de las dos normas exige el método utilizar para calcular la corriente de cortocircuito, aconsejando implementar el circuito en un software y hacer el análisis en la barra que se desee (cuando el sistema a evaluar no es tan complejo se puede utilizar métodos básicos de circuitos para el cálculo de la corriente de cortocircuito).

2) *Tensión Nominal:* Ambas normas consideran dentro del cálculo de la energía incidente la tensión nominal, en sistemas trifásicos es considerada la tensión entre fases.

3) *Distancia entre conductores:* considerada como la distancia entre dos puntos que se encuentren a diferente potencial, para el caso de los tableros eléctricos son los barrajes de cobre electrolíticos que se utilizan para las partes energizadas; la distancia varía de acuerdo al nivel de tensión del tablero o equipo (aire libre, interruptor, MCC o paneles y cable). A continuación en la Figura 2a en el círculo de color rojo se presentan los conductores (electrodos) al aire libre y en la Figura 2b los conductores encapsulados. Las imágenes fueron tomadas de la norma IEEE 1584, en donde explica la forma las características de las pruebas que se realizaron en el laboratorio.

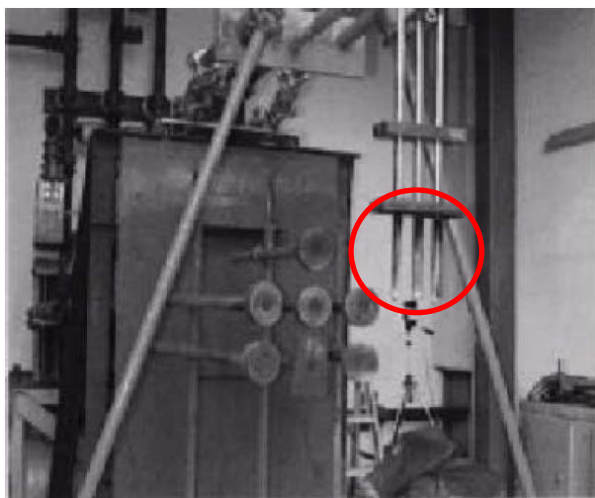


Figura 2a. Conductores al aire libre

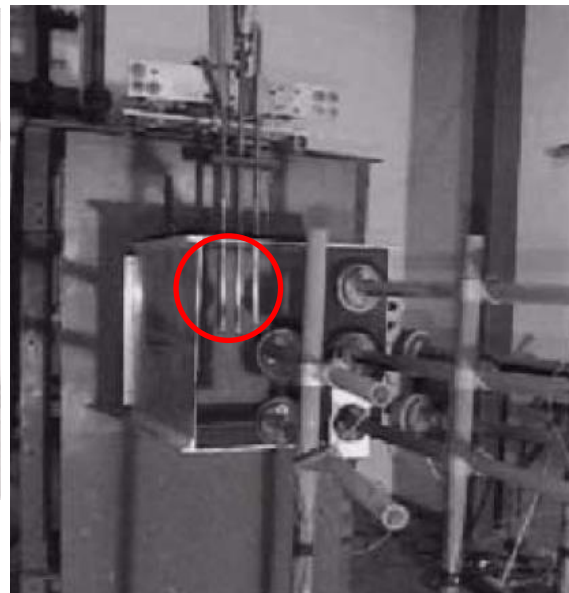


Figura 2b. Conductores encapsulados

La norma IEEE 1584 tiene establecidas las distancias aproximadas entre los conductores, las cuales depende del nivel de tensión y del tipo del equipo en donde se puede generar el arco eléctrico, a continuación en Tabla 3 se puede ver los valores especificados por la norma IEEE 1584.

Tabla 3 Distancia típica entre conductores (tomado de la Tabla 4 de la norma IEEE 1584)

Tensión Nominal (kV)	Tipo de equipo	Distancia entre conductores (mm)
0,208 – 1	Al aire libre	10 - 40
	Interruptor	32
	MCC y paneles	25
	Cable	13
>1 – 5	Al aire libre	102
	Interruptor	13 – 102
	Cable	13
>5 – 15	Al aire libre	13 – 153
	Interruptor	153
	Cable	13

4) *Distancia factor x*: Dicho factor depende de la tensión y del tipo de equipo donde se puede producir el arco eléctrico, la norma IEEE 1584 indica el valor que se debe utilizar al momento de calcular la energía incidente. Este factor se obtuvo mediante diferentes experimentos realizados en un laboratorio de potencia, variando diferentes características del arco eléctrico, entre ellas tensión, distancia entre conductores, tipo de equipo, entre otros [7][12], en la Tabla 4, se puede observar el factor x.

Tabla 4 Distancia factor x (tomado de la Tabla 2 de la norma IEEE 1584)

Tensión (kV)	Tipo de equipo	Distancia factor x
0.208 – 1	Al aire libre	2,000
	Interruptor	1,473
	MCC y paneles	1,641
	Cable	2,000
>1 – 5	Al aire libre	2,000
	Interruptor	0,973
	Cable	2,000
>5 – 15	Al aire libre	2,000
	Interruptor	0,973
	Cable	2,000

5) *Sistema de puesta a tierra*: se debe conocer detalladamente el comportamiento de todo el sistema al momento de despejar de falla, ya que estos factores influyen directamente en el valor de la energía incidente y en las consecuencias que puede ocasionar el arco eléctrico [5][7].

6) *Tipo de equipo (al aire/encapsulado)*, al momento de analizar la energía incidente se debe tener en cuenta el tipo de equipo donde se pueda generar el arco eléctrico, debido a que el arco encerrado en algún tipo de capsula tiende a aumentar el valor de la energía incidente y por ende el riesgo.

7) *Distancia de trabajo*, está definida como la distancia entre el posible punto del arco y la cabeza y el cuerpo del trabajador ubicado en el lugar para realizar la tarea asignada; la norma IEEE 1584 en la Tabla 3 “Clases de equipo y distancias de trabajo típicas” y la norma NFPA 70E en su Anexo D, establecen las distancias mínimas de trabajo que se deben considerar al momento de realizar el análisis de la energía incidente. En la Tabla 5 se presentan las distancias recomendadas por cada norma [13].

Tabla 5 Distancias típicas de trabajo (Anexo D NFPA 70E, Tabla 3 de la norma IEEE 1584)

Clase de equipo	Distancias de trabajo (mm)	
	IEEE 1584	NFPA 70E
Interrupor de 15 kV	910	910
Interrupor de 5 kV	910	910
Interrupor de baja tensión	610	610
MCC's y paneles de baja tensión	455	455
Cable	455	455
Otros	Determinar en campo	No aplica

La norma NFPA 70E incluye además dentro del Anexo C “Límites de aproximación”, los límites de trabajo que la persona debe respetar al momento de trabajar en lugares energizados, de acuerdo con Ralph Lee, las quemaduras mortales se dan aproximadamente a 5 pies de la fuente del arco (distancia de trabajo) y quemaduras importantes a 10 pies [1]. En la Figura 3, se observa los límites de proximidad establecidos

en la norma NFPA 70E.

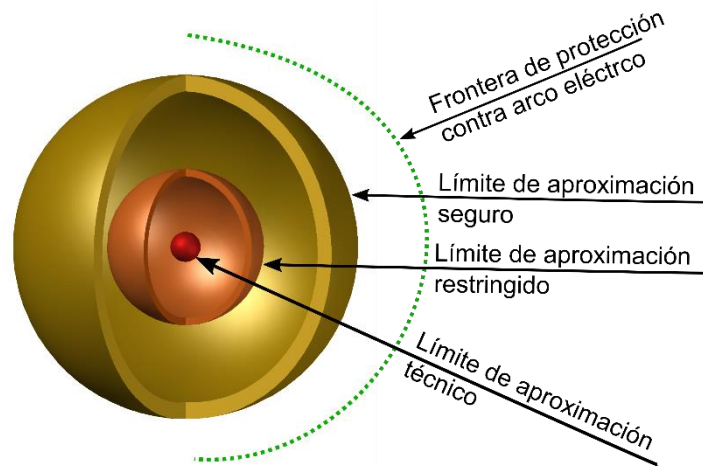


Figura 3 Límites de proximidad según la NFPA 70E

Frontera de protección contra arco eléctrico: es la distancia que deben mantener el personal no calificado a la fuente del arco o a la parte que esta energizada. El personal no debe cruzar esta frontera sin el equipo de protección adecuado y sin la supervisión del personal calificado.

Límite de aproximación seguro: esta frontera solo puede ser cruzada por el personal calificado, que tenga la capacidad de identificar los peligros y riesgos asociados con las tareas a realizar. Normalmente estas personas cuentan con el equipo de protección básico exigido por la empresa.

Límite de aproximación restringido: Para poder cruzar esta frontera hacia el espacio restringido, el personal calificado debe contar con la autorización para realizar trabajos eléctricos en lugares energizados y contar con el EPP para el nivel de tensión y la energía calculada. El personal debe procurar evitar el contacto corporal con partes energizadas, utilizando solo el cuerpo protegido para llevar a cabo el trabajo, además las herramientas y el equipo a utilizar debe ser aislado.

Límite de aproximación técnico: Dentro de este espacio se tiene una distancia mínima a la parte expuesta o energizada, al entrar en este espacio se considera con un alto porcentaje de riesgo por arco eléctrico.

De acuerdo con la norma NFPA 70E después de calcular la energía incidente se debe determinar el EPP que debe utilizar la persona al entrar en la frontera de aproximación

restringida, como se observa en la Tabla 6, el valor de la energía incidente está asociado con la categoría del EPP:

Tabla 6 Resumen Tabla 130.7(C)(16) de la NFPA 70E

Energía incidente (cal/cm ²)	Categoría
0 – 1,2	0
1,2 - 4 o menos	1
4 - 8 o menos	2
8 - 25 o menos	3
25 - 40 o menos	4

Cada una de las categorías tiene especificado el tipo de prendas que se debe usar al momento de entrar en la frontera de aproximación restringida, siendo la categoría 0 la menos conservadora permitiendo mayor movilidad y la categoría 4 la más conservadora dificultando la movilidad de la persona [5].

Se aclara que al momento de determinar la energía incidente se puede utilizar la norma NFPA 70E o la norma IEEE 1584 y a partir de allí en todos los casos se debe determinar los límites de aproximación y el EPP.

7) *Información de la protección:* Se debe conocer el tipo de protección implementado dentro del sistema, ya que de ella depende el tiempo de despeje de la falla o dicho en otras palabras la duración del arco. La norma NFPA 70E, establece que el tiempo máximo para que una persona se pueda alejar de un arco eléctrico es de dos (2) segundos, sin embargo, si la persona está encerrada por algún equipo o un algún elemento que pueda impedir su movimiento, el tiempo puede ser mayor a dos (2) segundos, aumentando el nivel de riesgo, por ello la norma NFPA 70E en el Anexo D y la norma IEEE 1584 en la Tabla 1 “Tiempos de funcionamiento del interruptor de potencia” determinan los valores aproximados para despejar la falla dependiendo del tipo de protección.

Los tiempos de despeje de las norma NFPA 70E y de la norma IEEE 1584, son valores guía, sin embargo para determinar el tiempo de despeje de la falla, se debe tener en cuenta todos los elementos del sistema eléctrico, normalmente este valor se determina mediante un estudio de coordinación de protecciones de todo el sistema.

2.2 Ecuaciones para el cálculo de la energía incidente con la norma NFPA 70E

Método de cálculo - Ralph Lee

Ralph Lee [1] en 1982, planteo la siguiente ecuación para calcular la energía incidente, igualmente se presentan las restricciones al momento de utilizar la ecuación:

Restricciones:

Solo para arcos al aire libre, tensiones superiores a 600 V, no específica falla trifásica o monofásica

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

Donde,

E: Energía incidente (cal/cm²), **F:** Corriente de cortocircuito (kA), **V:** Tensión Nominal (kV), **t:** Tiempo de despeje de la falla (s), **D:** Distancia de trabajo (in).

Método de cálculo - Dought Neal

Doughty, Neal [6] en el año 2000, incluyó por primera vez el cálculo de la energía incidente para el arco eléctrico encapsulado. Sus restricciones se presentan a continuación [3] [5]:

Restricciones:

Tensiones inferiores a 600 V, corriente de cortocircuito entre 16 kA a 50 kA, corriente de cortocircuito trifásico

Arco al aire libre

$$E_{MA} = 5271 D_A^{-1.9593} t_A [0.0016 F^2 - 0.0076 F + 0.8938] \quad (3)$$

Arco en caja

$$E_{MB} = 1038.7 D_A^{-1.4738} t_A [0.0093 F^2 - 0.3453 F + 5.9675] \quad (4)$$

Donde,

E_{MA}: Energía incidente - arco al aire libre (cal/cm²), **E_{MB}**: Energía incidente - arco en caja (cal/cm²), **D_A**: Distancia de trabajo (in), **t_A**: Tiempo de despeje de la falla (s), **F**: Corriente de cortocircuito (kA).

2.3 Ecuaciones para el cálculo de la energía incidente con la norma IEEE 1584

Tim Crnko and Steve Dynes [12] en el año 2001, presentaron que algunas consideraciones dentro del diseño de un sistema eléctrico puede reducir el riesgo por arco eléctrico, por tanto la norma IEEE 1584 planteo diferentes ecuaciones para el cálculo de la energía incidente en arcos al aire libre y en arcos encapsulados [3][7].

Restricciones:

Tensiones entre 0,208 kV a 15 kV, corriente de cortocircuito entre 0,7 kA a 106 kA, Frecuencias entre 50 Hz a 60 Hz, distancia entre conductores entre 13 mm a 152 mm, corriente de cortocircuito

Cálculo de la corriente de arco, para tensiones menores a 1000 V

$$\lg I_a = k + 0.662(\lg I_{bf}) + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf}) \quad (5)$$

Cálculo de la corriente de arco, para tensiones mayores a 1000 V

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983(\lg I_{bf}) \quad (6)$$

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (7)$$

Donde,

lg: \lg_{10} , **Ia**: Corriente del arco (kA), **k**: -0,153 para arcos al aire libre y -0,097 para arcos en caja, **Ibf**: Corriente de cortocircuito (kA), **V**: Tensión nominal (kV), **G**: Distancia entre conductores (mm) (ver Tabla 3).

Cálculo de la energía incidente

Después de calcular la corriente de arco se debe calcular la energía incidente normalizada, esta ecuación se basa en datos normalizados para un arco con un tiempo de duración igual a 0,2 segundos y una distancia de trabajo de 610 mm.

$$\lg E_n = k_1 + k_2 + 1.081(\lg I_a) + 0.0011G \quad (8)$$

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (9)$$

Donde,

En: Energía incidente normalizada a una distancia y un tiempo de exposición al arco (J/cm^2), **k1**: -0,972 para arcos al aire libre y -0,555 para arcos encapsulados, **k2**: 0 para sistemas sin conexión a puesta tierra y de alta resistencia y -0,113 para sistemas con conexión a puesta tierra, **G**: Distancia entre conductores (mm ver Tabla 3).

Por último para convertir la energía incidente normalizada a energía incidente normal, se aplica la siguiente ecuación:

$$E = 4.184C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (10)$$

Donde,

E: Energía incidente (J/cm^2), **En**: Energía incidente normalizada para el tiempo y la distancia (J/cm^2), **Cf**: Factor 1,0 para tensiones mayores a 1 kV y factor 1,5 para tensiones menores a 1 kV, **D**: Distancia de trabajo (mm), **x**: Distancia factor x (ver Tabla 4), **t**: tiempo de despeje de la falla (s).

Energía incidente para tensiones mayores a 15 kV

Para el caso cuando la tensión sea mayor a 15 kV o que la distancia entre los conductores supere el rango de los límites establecidos, se debe calcular la energía incidente con la siguiente ecuación.

$$E = 2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (11)$$

Donde,

E: Energía incidente (J/cm²), **V:** Tensión del sistema (kV), **t:** tiempo de despeje de la falla (s), **D:** Distancia de trabajo (mm), **I_{bf}:** Corriente de cortocircuito (kA).

Después de calcular la energía incidente ambas normas permiten calcular los límites de protección, las ecuaciones para dicho cálculo se mencionan a continuación.

2.4 Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma NFPA 70E

A continuación se presenta las ecuaciones para calcular distancia de la persona a la fuente del arco para quemaduras curables (es decir una temperatura de la piel inferior a 80°C) [3] [5].

$$MVA_{bf} = \sqrt{3} \times V \times I_{sc} \times 10^{-6} \quad (12)$$

$$D_c = \left[2.65 \times MVA_{bf} \times t \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$D_c = \left[53 \times MVA \times t \right]^{1/2} \quad (14)$$

Donde,

V: Tensión Nominal (V), **I_{sc}:** Corriente de cortocircuito simétrica (A), **D_c:** Distancia trabajo, **MVA_{bf}:** Potencia de la corriente de cortocircuito (MVA), **MVA:** Potencia del transformador, si la potencia es menor a 0,75 MVA multiplicar el valor por 1,25 (MVA), **t:** tiempo de despeje de la falla (s).

2.5 Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma IEEE 1584

A continuación se presenta las ecuaciones utilizadas por la norma IEEE 1584 para calcular distancia de la persona a la fuente del arco para quemaduras curables.

Frontera de protección de acuerdo al modelo empírico de la norma IEEE 1584:

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{1/x} \quad (15)$$

Frontera de protección por el método de Ralph Lee:

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (16)$$

Donde,

D_B: Distancia de trabajo (mm), **C_f**: Factor 1,0 para tensiones mayores a 1 kV y 1,5 para tensiones menores a 1 kV, **E_n**: Energía incidente normalizada, **E_B**: Energía incidente a la distancia límite (J/cm²), **t**: tiempo de despeje de la falla (s), **x**: distancia exponente (ver Tabla 4), **I_{bf}**: Corriente de cortocircuito (kA). Cuando la persona no tiene ningún tipo de protección el valor **E_B** es igual a 5 J/cm², sin embargo cuando la persona está utilizando un EPP, el valor **E_B** es igual a la energía incidente que soporta el EPP.

Para finalizar el capítulo, se realiza una breve comparación entre la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584, observando que la norma IEEE 1584 requiere más datos para calcular la energía incidente y está limitada por las distancias entre conductores, por ello, se debe conocer las especificaciones del sistema a analizar.

Por otro lado la norma NFPA 70E permite determina la energía incidente teniendo datos básicos de un sistema, sin embargo, la restricción del rango de las corrientes de cortocircuito es muy limitado teniendo en cuenta que en la industria se pueden observar corrientes por fuera de estos límites.

2.6 Resumen

Para el cálculo de la energía incidente se debe conocer algunas características del sistema donde se desea conocer el valor de la energía incidente. La norma IEEE 1584 exige mayor conocimiento de la instalación, ya requiere mayores requisitos que la norma NFPA 70E para realizar el cálculo, adicional se debe tener en cuenta que cada norma tiene sus propias restricciones para dicho cálculo. A continuación se presenta un cuadro comparativo donde se compara los requisitos y restricciones para calcular la energía incidente de cada norma.

Requisitos para el cálculo de la energía incidente	
Norma NFPA 70E	Norma IEEE1584
<ul style="list-style-type: none"> • Corriente de cortocircuito • Tensión del sistema • Tiempo de despeje de la falla • Distancia de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente de cortocircuito • Tensión del sistema • Tiempo de despeje de la falla • Distancia de trabajo • Distancia entre electrodos • Información del sistema de puesta a tierra
Restricciones para el cálculo de la energía incidente	
Norma NFPA 70E	Norma IEEE 1584
<ul style="list-style-type: none"> • Solo se aceptan corriente de cortocircuito entre 16 kA a 50 kA. • Para tensiones mayores a 600 V se vuelve más conservadora. • No se especifica si el sistema debe ser trifásico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo se aceptan corrientes de cortocircuito entre 0,7 kA a 106 kA. • Para tensiones mayores a 15000 V se vuelve más conservadora. • El sistema debe ser trifásico. • La distancia entre electrodos debe ser de 13 mm a 152 mm. • Frecuencias entre 50 Hz a 60 Hz.

Diferencias entre las normas

- La norma IEEE 1584 requiere más datos para calcular la energía incidente, siendo la distancia entre electrodos el dato más difícil de conseguir, el cual se obtiene de acuerdo a las especificaciones técnicas de los proveedores de los tableros o celdas eléctricas.

- La norma NFPA 70E tiene como mayor restricción el limitado rango de las corrientes de cortocircuito, debido que muchos de los sistemas tienen corrientes de cortocircuito menores a 16 kA.

CAPÍTULO 3

CONCEPTUALIZACIÓN FÍSICA

Este capítulo presenta el origen físico, los factores y las consecuencias del arco eléctrico, al entender el concepto físico de la conformación del arco, podemos tener una idea más clara de cómo evitar o disminuir el riesgo por este fenómeno. En la última parte del capítulo, se presenta las consecuencias que las personas pueden sufrir al estar expuestas a un arco eléctrico.

3. CONCEPTUALIZACIÓN FÍSICA

AL entender el fenómeno físico del arco eléctrico, podemos conocer el origen y las causas en las personas e instalaciones y de esta manera disminuir o eliminar los peligros del personal al interactuar con instalaciones energizadas. A continuación se da a conocer el origen, los factores y las consecuencias del arco eléctrico:

3.1 Origen del arco eléctrico

El término “Arco eléctrico” se aplica al paso de la corriente a través de lo que previamente ha sido aire, sin embargo, el aire no es el conductor, es el vapor, que se genera por las altas temperaturas en el material de los dos terminales del arco eléctrico, caracterizándose por tener altas corrientes y bajas tensiones [1].

Este fenómeno normalmente se produce entre dos electrodos que están sometidos a diferente potencial (ánodo y cátodo), separados por un aislante como el aire o gas; cuando los electrodos alcanzan altas temperaturas, debido a una falla normalmente por cortocircuito, permite que los átomos que están en los electrodos empiecen el proceso de ionización mediante el choque de iones libres, que van desde el ánodo al cátodo impactando fuertemente el metal, en la Figura 4 (a), se observa que cada átomo tiene igual número de electrones y protones; en la Figura 4 (b), los átomos alcanzan una alta temperatura, empezando el proceso de ionización, donde los electrones salen de órbita. En la Figura 4 (c), se puede ver que los electrones se han separado del núcleo, por tanto el átomo está totalmente ionizado [13] [14].

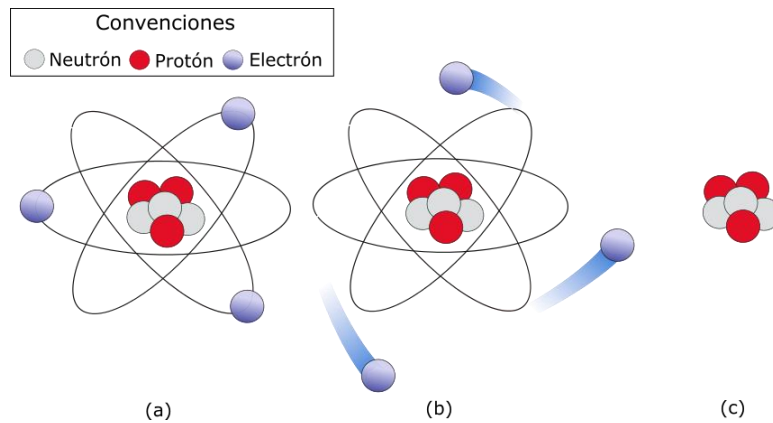


Figura 4 Ionización de los átomos

Al empezar el proceso de ionización, el aislante entre los dos terminales se convierte en una columna de plasma, en donde electrones siguen su camino hacia el ánodo, cediendo su energía cinética en calor. La temperatura en el ánodo es más alta en el cátodo, ya que los electrones impactan a una velocidad de 16 km/s, permitiendo alcanzar temperaturas de 20.000°C (35.000°F). En la Figura 5, se puede observar, la conformación de la columna de plasma.

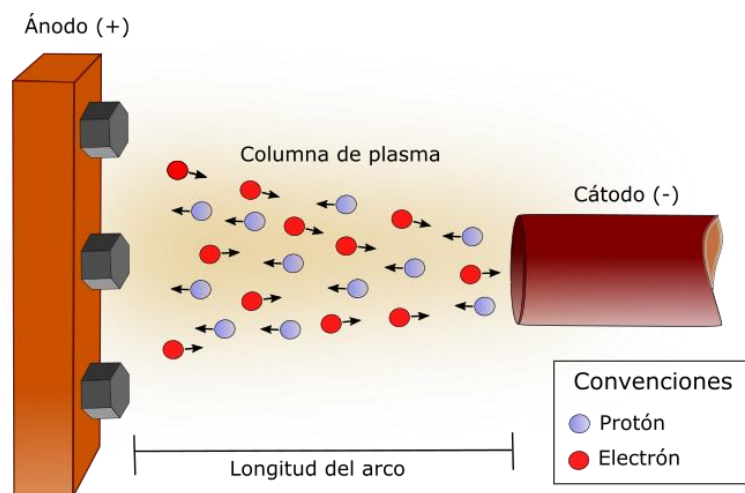


Figura 5 Conformación de la columna de plasma

La columna de plasma se compone de moléculas gaseosas y no de moléculas metálicas, por tanto la temperatura del arco se mantiene por simple emisión térmica alcanzando valores de 13.000°K [3], al mantener las condiciones de descarga de iones positivos y electrones requeridos para continuar con la circulación de corriente, permite

que el arco pueda autosostenerse y permanecer en un equilibrio estable. Las características del arco dependen del tamaño del catodo y ánodo, de la naturaleza del gas o recubrimiento del electrodo y de la longitud el arco [13].

3.2 Factores que generan el arco eléctrico

Un arco eléctrico se origina principalmente por cortocircuitos, sin embargo, también se pueden generar por acciones de desconexión de interruptores, intervenciones en transformadores, mantenimiento en barrajes, instalación o interrupción de circuitos eléctricos bajo corriente [8] [15] [16]. Los factores que inician el arco eléctrico son debidos a accidentes, malas maniobras por parte del personal, falta de mantenimiento a las instalaciones eléctricas o lugares donde hay concentración de polvo. Los factores que favorecen el inicio del arco eléctrico son [15]:

Contactos defectuosos entre dos conductores o a tierra, pueden generar cortocircuitos.

La Condensación de vapor y goteo de agua, permiten que se genere fácilmente el transporte de la corriente en la superficie de los materiales aislantes incrementado el potencial del arco eléctrico.

Los Polvos e impurezas aumentan la conducción en la superficie del aislador o ruptura en el cuerpo del mismo, lo que conlleva a una falla en el aislamiento, generando una descarga a través de la superficie.

La corrosión por oxido u otro elemento corrosivo, debilita el contacto entre los terminales, incremento la resistencia y el diferencial de potencial entre terminales.

El no tener en cuenta la distancia mínima entre conductores o fases, aumenta la posibilidad que al ocurrir sobretensiones temporales, el aislamiento del material de los conductores se caliente y rompan el aislamiento que los separada (aire o gas) generando el arco eléctrico.

Los *accidentes* pueden ser causados por contactos involuntarios a algún elemento energizado con el cuerpo o con alguna herramienta.

Las malas prácticas por parte del personal al hacer interrupciones en equipos, permiten que haya una falla por cortocircuito en el interruptor automático o en el fusible.

Desarrollo del arco al aire libre

El comportamiento, las características y las consecuencias de un arco al aire libre son diferentes a un arco en caja, por tanto, cada uno tiene diferentes análisis, a continuación se presentan las cuatro fases durante el desarrollo de un arco en caja [17]:

Fase de compresión, al producirse un arco eléctrico dentro de una caja, éste calienta el volumen donde inicia el arco debido a la liberación de energía; el volumen de aire restante dentro de la caja, se calienta por convección y radiación, generando que dentro de la caja diferentes temperaturas y presiones.

Fase de expansión, debido al aumento de la presión, se forma un orificio a través del cual el aire sobrecalentado comienza a escapar y cuando la presión alcanza su valor máximo, este comienza a disminuir a partir de la liberación del aire caliente.

Fase de emisión, debido a la continua contribución de la energía producida por el arco, casi todo el aire es expulsado por una sobrepresión constante.

Fase térmica, cuando se ha expulsado todo el aire, la temperatura en el interior de la caja es similar a la del arco, esta fase es la última, ya que todos los metales y los materiales aislantes se funden con la producción de gases.

Desarrollo del arco encapsulado

Al producirse un arco al aire libre, puede que algunas de las fases descritas en el arco en caja no se presenten o tengan una intensidad menor. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una de las consecuencias son los altos niveles de temperatura, que pueden generar quemaduras graves o la muerte. Otra de las consecuencias es una onda de presión externa llamada “Arc Blast”, afectando directamente el pecho, cerca al corazón de la persona, a su vez expulsa partículas metálicas incandescentes y fragmentos de metal sólido que pueden provocar quemaduras de tercer grado. El Arc Blast puede alcanzar medidas de presión de 2160 lbs/ft² y un nivel en el sonido de 165 dB a una distancia de 2 pies [3] [17].

3.3 Consecuencias del arco eléctrico

Una de las principales causas por el cual se estudia el arco eléctrico, es por el peligro que representa para la vida, sin embargo, la mayoría de personas no tienen conciencia de las consecuencias de la liberación de luz intensa, del calor y la presión (Arc Blast) generados por los arcos eléctricos [17]. A continuación se dan a conocer algunos riesgos por exposición al arco eléctrico [15] [17]:

Quemaduras, de acuerdo, a diferentes estudios podemos evidenciar que el cuerpo humano puede soportar temperaturas cercanas a la sangre, 36,5°C (98,6°F); cuando la piel percibe una temperatura de 44°C (110°F), el mecanismo de la temperatura corporal comienza a descomponerse, por lo que el daño celular ocurre pasado 6 horas; cuando la temperatura esta entre 44°C y 51°C, la tasa de la destrucción celular se duplica por cada aumento de la temperatura de 1°C y cuando la temperatura es mayor a 51°C, la velocidad es extremadamente rápida. A 70°C la destrucción celular se dará en 1 segundo. Si la temperatura, a la que está expuesta la persona supera los 96°C y el intervalo de tiempo es mayor a 0,1 segundos y menor a 1 segundo, la persona sufrirá quemaduras incurables [1].

Pérdida de la visión, al producirse el arco eléctrico, este emite un destello de luz, el cual emite rayos ultravioleta e infrarrojos, causado quemadura en la piel y ojos de las personas.

Lesiones por materiales expulsados, debido a las altas presiones que se presentan dentro del arco eléctrico, puede haber expulsión de partículas metálicas u objetos que se desprenden de las celdas. Estos elementos pueden causar lesiones en partes sensibles del cuerpo. Además cuando la presión es tan alta, la persona puede ser arrojada a metros del lugar del incidente.

Pérdida auditiva, según la Organización Mundial de la Salud (OMG), el nivel de ruido que puede tolerar el oído humano, sin alterar la salud es de 55 dB, considerando que a al tener una mayor potencia del sonido el oído puede soportar menos tiempo sin generar daño. Cuando se trata de sonidos categorizados como impulsos, correspondiente a ruidos repentinos, como el caso de una explosión, la onda del sonido no debe exceder los 140 dB. Como se mencionó anteriormente, el arco eléctrico aumenta la presión del entorno, por tanto emite sonidos de hasta 165 dB.

Inhalación de gases tóxicos, cuando el arco eléctrico alcanza sus altas temperaturas, los diferentes metales y aislantes de los conductores son fundidos por un tipo de

combustión, esto genera vapores, los cuales pueden ser tóxicos para las vías respiratorias de la persona, causando trastornos en diferentes órganos, el sistema nervioso central, el riñón o la médula ósea.

De acuerdo a las consecuencias tan severas que puede causar el arco eléctrico, el personal debe evaluar los riesgos por arco eléctrico al trabajar en o cerca a lugares energizados, al encontrar peligro, la persona debe utilizar EPP y cumplir con ciertos límites de proximidad. El RETIE 2013 exige realizar un análisis mediante la norma NFPA 70E o la norma IEEE 1584 [8].

A lo largo de los años se han realizado diferentes estudios para disminuir las consecuencias de los riesgos debido al arco eléctrico, en el siguiente capítulo se da a conocer la aplicación del cálculo de la energía incidente en la ingeniería.

3.4 Resumen

El tercer capítulo presenta el origen físico de los arcos eléctricos, la forma como se originan, los factores que favorecen su origen y las consecuencias que se ocasionan al momento de su ocurrencia. A continuación se presenta un cuadro resumen.

Los arcos eléctricos se generan normalmente por:

- Cortocircuitos
- Desconexión de interruptores
- Intervenciones en transformadores
- Mantenimiento en barrajes
- Instalación o interrupción de circuitos eléctricos bajo corriente

Los factores que los generan son:

- Malas maniobras por parte del personal
- Falta de mantenimiento a las instalaciones eléctricas
- Lugares donde hay concentración de polvo

Consecuencias del arco eléctrico

- Quemaduras

- Pérdida de la visión
- Lesiones por materiales expulsados
- Pérdida auditiva
- Inhalación de gases tóxicos

Es importante conocer el origen físico de los arcos eléctricos, ya que mediante mantenimientos preventivos y procedimientos de seguridad al momento de realizar actividades en equipos energizados, se puede minimizar en gran porcentaje el número de accidentes por arco eléctrico.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA

En este capítulo se presenta la aplicación del cálculo de la energía incidente en la ingeniería, para ello se presenta los diferentes métodos para disminuir el riesgo por arco eléctrico en las industrias, el primer método consiste en atacar la fuente del arco eléctrico, el segundo método se basa en atacar el canal y por último enfocarse en protección de la persona. Al final del artículo se presentan las diferentes formas de poder disminuir el riesgo por arco eléctrico

4.1 Fuente del arco

Para disminuir los riesgos por arco eléctrico desde la fuente, se puede hacer mediante una adecuada coordinación de protecciones o mediante la utilización diversas celdas protegidas internamente contra el arco eléctrico.

Coordinación de protecciones

El objetivo de una adecuada coordinación de protecciones es detectar la falla más cercana aguas arriba y despejarla en el menor tiempo posible, protegiendo el aislamiento de los equipos eléctricos, conductores y demás elementos que interactúan en el sistema eléctrico.

Para seleccionar la protección adecuada se debe conocer el comportamiento de la corriente de cortocircuito, conformada por dos componentes **1) Asimétrica**: Una componente unidireccional envolvente exponencial, la cual se da durante el estado subtransitorio y transitorio y **2) Simétrica**: Una componente alterna sinusoidal, el cual se alcanza después del estado permanente, los tiempos de los estados de la corriente dependen del número de inductores conectados al sistema. La norma IEEE Std 242, plantea que la corriente de cortocircuito es la suma de cuatro componentes, tres componentes alternas: a) subtransitoria ver Figura 7, b) transitoria ver Figura 10 y c) permanente ver Figura 9 y una componente unidireccional a) componente de corriente continua ver Figura 8.

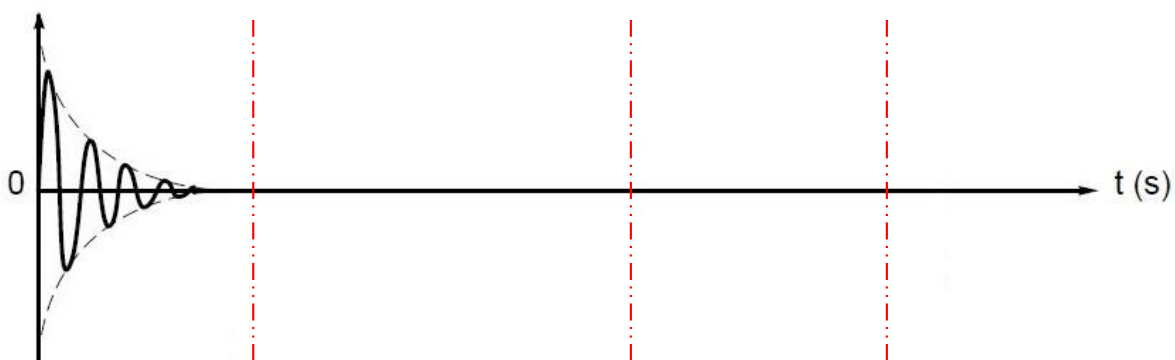


Figura 7 Componente subtransitoria

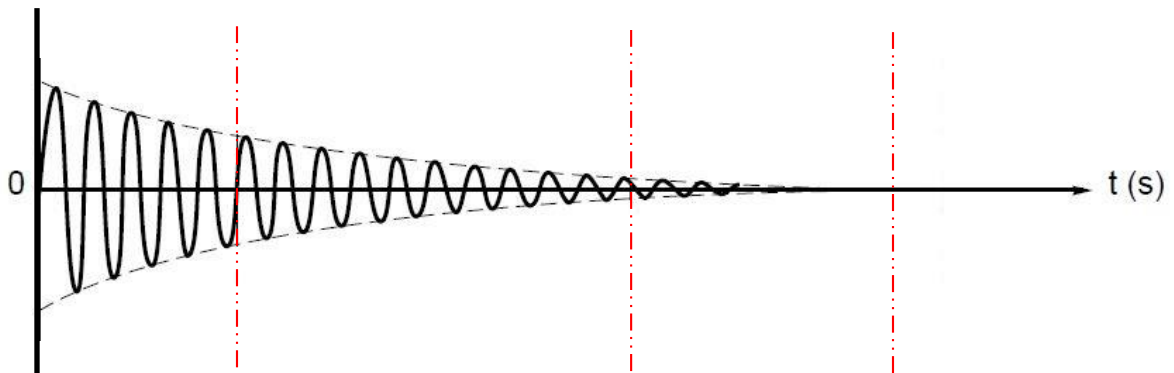


Figura 8 Componente transitoria

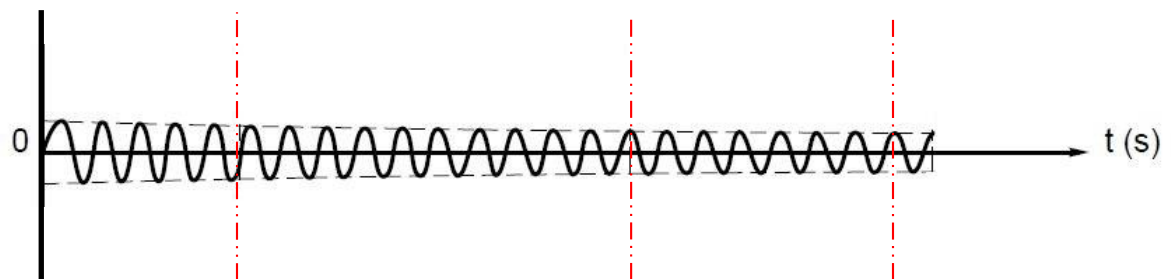


Figura 9 Componentes permanente



Figura 10 Componente de corriente continua

Como se puede observar en las Figuras el tiempo de duración de la componente subtransitoria es menor a la transitoria y ésta inferior a la permanente, por tanto este comportamiento induce que la corriente de cortocircuito disminuya progresivamente. Por último, el comportamiento de la componente de corriente continua depende del

momento en donde ocurra el fallo, si el cortocircuito ocurre cuando la tensión está pasando por su valor máximo la intensidad de corriente será cero. Si por el contrario el cortocircuito ocurre cuando el valor de la tensión pasa por cero, la intensidad de corriente presentará su valor máximo.

En la Figura 8, se puede ver el caso donde el cortocircuito se genera cuando la tensión pasa por su valor máximo, por tanto se observa que la gráfica decae exponencialmente ya que comporta como un circuito inductivo, debido que para los sistemas de media y alta tensión el valor de la inductancia es mayor que la resistencia. Las características de la gráfica dependen de número de máquinas y elementos conectados a la red.

El comportamiento de la corriente de cortocircuito se establece como la sumatoria de todas las componentes presentadas anteriormente, a continuación en la Figura 11 se presenta su comportamiento.

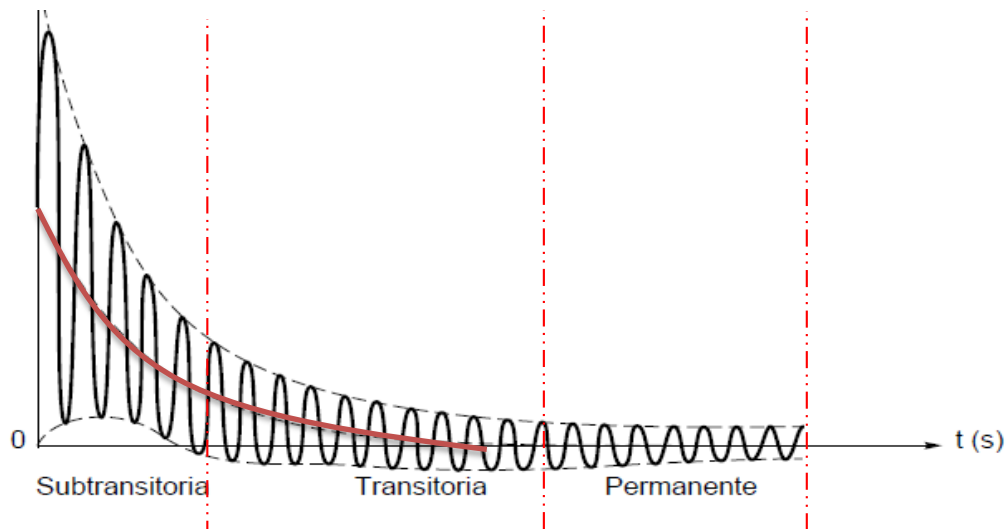


Figura 11 Componentes de la corriente de cortocircuito, Cuadernillo Técnico N° 158 de Schneider Electric.

Como se puede ver en la Figura 11, la corriente de cortocircuito en el estado asimétrico tiene poca duración y es aproximadamente 1,5 veces mayor que la corriente en su estado simétrico, por tanto, todos los conductores y las protecciones deben estar diseñadas para soportar el pico más alto de la corriente de cortocircuito en su estado asimétrico [18][19][20].

Los métodos más comunes para determinar la corriente de cortocircuito son: **1)**

Método de las impedancias, se aplica a sistemas radiales o mallados, hasta tensiones de 230 kV. Este método, se basa en sumar separadamente las diferentes resistencias y reactancias de los transformadores, conductores, motores, añadiendo por último los generadores, finalizando en el punto del análisis de cortocircuito [18]; **2) IEEE 1584 – Método de las componentes simétricas**, se utiliza para redes trifásicas desequilibradas, ya que tiene en cuenta los fenómenos magnéticos de las impedancias [20]. Los métodos mencionados anteriormente se utilizan para determinar el valor de la corriente simétrica y para obtener el valor de la corriente asimétrica, se puede hallar mediante una relación entre la magnitud del régimen asimétrico respecto al régimen simétrico, de acuerdo con la norma IEC 60909-1 [18].

Después de obtener el valor de la corriente asimétrica, se selecciona la protección dependiendo del nivel de tensión y del tiempo de despeje de la falla el cual debe ser menor a 0,15 segundos de acuerdo al RETIE 2013 [8], mientras que la norma NFPA 70E y la IEEE 1584 el tiempo de despeje de la falla debe ser menor a los tiempos de la Tabla 7.

Tabla 7 Tiempo de despeje de la falla (Anexo D NFPA 70E, Tabla 1 IEEE 1584).

Tiempo de despeje de la falla		
Tipo de protección	Tiempo de apertura NFPA 70E (s)	Tiempo de apertura IEEE 1584 (s)
Limitador de corriente	0,004	
Interruptor de 5000 V a 15000 V	0,1	
Baja tensión – caja moldeada – disparo integral <600 V	0,03	0,025
Baja tensión – caja moldeada – disparo integral <1000 V		0,025
Baja tensión – caja aislada – Icc <25 kA, <600 V	0,03	
Baja tensión – caja aislada – Icc <42 kA, <600 V	0,33	
Baja tensión – caja aislada – interruptor de potencia – disparo integrado o relé accionado <1000 V		0,050
Media tensión 1000 V – 35,000 V		0,080
Alta tensión >35,000 V		0,130

Como se puede observar, los tiempos de despeje de la falla que sugieren la norma

NFPA 70E y la norma IEEE 1584 son menores al mencionado por el RETIE, debido que el objetivo de las normas es disminuir o eliminar el riesgo por arco eléctrico y al aumentar la duración de la falla se tendrá una mayor energía incidente lo que puede ocasionar daños irreversibles en las personas y en la instalación. En la actualidad no es posible encontrar protecciones que actúen en los tiempos establecidos por las normas, debido a que es muy difícil que la protección pueda disipar la energía de la corriente de cortocircuito en su estado asimétrico.

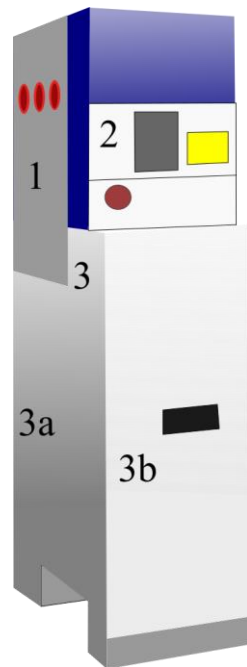
Otras características adicionales que se deben tener en cuenta al momento de realizar la correcta coordinación de protecciones son: el poder de corte que deben soportar los interruptores, la potencia de cierre de los diferentes dispositivos de maniobra y la sollicitación electrodinámica generada en los diferentes componentes y conductores eléctricos; las protecciones deben eliminar la falla en el menos tiempo posible asegurando que los conductores puedan soportar la corriente de falla [20][21][22][23]. Al tener todo los parámetros necesarios para la coordinación de protecciones, se debe implementar el sistema en un software especializado analizando que la protección cumpla con todos los requisitos mencionados anteriormente. Al procurar cumplir con los tiempos de operación de las protecciones lo más cercano posible por la norma NFPA 70E o por norma la IEEE 1584, se está disminuyendo en gran medida los riesgos que puede ocasionar un arco eléctrico, en la persona y en el sistema, esta es una de las maneras de reducir el riesgo eléctrico por arco eléctrico en la fuente, a continuación se presenta la segunda forma de reducir el riesgo desde la fuente.

Celdas modulares

Durante muchos años solo existían las celdas aisladas con aire, sin protección contra arco eléctrico, sin embargo, al observar el gran número de accidentes por arco eléctrico, entre los años 1960 y 1970 se implementó por primera vez los interruptores aislados en hexafluoruro de azufre (SF_6), siendo no tóxico, estable, no inflamable, inodoro, incoloro y con una rigidez dieléctrica mayor en 2.5 veces a la rigidez del aire (presión atmosférica). El SF_6 es un compuesto sintético producido electroquímicamente el cual hace burbujear el flúor en su estado gaseoso a través del azufre. Gracias a sus propiedades físicas es ideal para disminuir la energía producida por un arco eléctrico, esto se debe a la gran cantidad de energía que debe ceder el arco eléctrico para sostener sus propiedades en presencia del gas. Explicado en otros términos químicos el SF_6 se disocia absorbiendo en gran

cantidad la energía expulsada por el arco eléctrico [24].

En la actualidad se utiliza el SF₆ como extinción del arco en los interruptores de potencia, interruptores de alta tensión, subestaciones encapsuladas, entre otros. Para su adecuada operación se debe evitar la humedad y orificios que permitan la presencia de aire en la celda, ya que se pueden producir compuestos tóxicos y con malas propiedades dieléctricas, aumentando el riesgo eléctrico en los equipos y en las personas en cercanía. A continuación, se va a describir las partes y funcionamiento de una celda modular con aislamiento SF₆. (El funcionamiento y las partes pueden variar dependiendo de la marca y del equipo a utilizar).



- 1) **Cuba:** Contiene los elementos de corte y circuitos principales; cuenta con una membrana que permite que los gases del arco se evacuen de forma segura. Los fusibles están dispuestos para cada una de las fases y mediante los portafusibles se proporciona un correcto aislamiento.
- 2) **Zona de mecanismos de maniobra:** Mediante diferentes mecanismos, pulsadores e indicadores se puede realizar la conexión y desconexión de los diferentes circuitos presentes dentro de la celda. Hay diferentes tipos de maniobra:

Interruptor de tres posiciones o automático y el tipo de maniobra.

3a) Compartimiento de expansión: Evacua los gases generados al arco eléctrico mediante una membrana de expulsión.

3b) Compartimiento de cables: Permite que haya facilidad al momento de realizar diferentes conexiones del seccionador. Los cables del exterior se aíslan y se conectan a los transformadores de corriente y potencial mediante pasatapas.

Dentro de la celda modular se encuentra la protección que se acciona al detectar una falla y a su vez todos los elementos que permiten realizar la extinción del arco, por tanto, utilizar este tipo de tecnología tienen las siguientes ventajas: mantenimiento económico, seguridad al momento de realizar cualquier tipo de maniobra al tener conectada la carga, protección contra diferentes maniobras que aumenten el riesgo de un arco eléctrico.

Actualmente se ha implementado diferentes tecnologías para disminuir las celdas con aislamiento en gas SF₆, utilizando interruptores al vacío, los cuales no requieren mantenimiento y aseguran una alta confiabilidad al momento de realizar las maniobras u operaciones en los interruptores de los de circuitos.

Hasta el momento se ha observado que al utilizar una adecuada coordinación de protecciones y la utilización de las celdas con aislamiento en gas SF₆ y al vacío, se puede disminuir desde la fuente las consecuencias generadas por el arco eléctrico. A continuación se prosigue a dar conocer la forma de disminuir el arco eléctrico desde el canal que comunica la persona con la fuente.

4.2 Canal

Distancias de seguridad

El termino canal se le denomina al espacio que hay entre la persona y la fuente del arco eléctrico, en otras palabras es la distancia de trabajo. Al alejar la persona lo más posible de la fuente del arco, la energía incidente disminuye por tanto las consecuencias y el nivel de riesgo se reducen [25]. En Colombia, de acuerdo al artículo 13.4 del RETIE 2013, se debe delimitar el límite de aproximación restringida mediante una franja que permita tener un encerramiento temporal, el valor de la distancia de aproximación restringida se especifica en la Tabla 13.7 o 13.8 del RETIE, las cuales fueron adaptadas de la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584. En la

Tabla 8 se presentan las distancias de aproximación exigidas por el RETIE para corriente alterna.

Tabla 8 Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente alterna (tomado de la Tabla 13.7 RETIE)

Tensión nominal del sistema	Límite de aproximación seguro [m]		Límite de aproximación restringida [m] Incluye movimientos involuntarios	Límite de aproximación técnica [m]
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta		
50 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto	Evitar contacto
301 V – 750 V	3,0	1,0	0,30	0,025
751 V – 15 kV	3,0	1,5	0,7	0,2
15,1 kV – 36 kV	3,0	1,8	0,8	0,3
36,1 kV – 46 kV	3,0	2,5	0,8	0,4
46,1 kV – 72,5 kV	3,0	2,5	1,0	0,7
72,6 kV – 121 kV	3,3	2,5	1,0	0,8
148 kV – 145 kV	3,4	3,0	1,2	1,0
161 kV – 169 kV	3,6	3,6	1,3	1,1
230 kV – 242 kV	4,0	4,0	1,7	1,6
345 kV – 362 kV	4,7	4,7	2,8	2,6
500 kV - 550 kV	5,8	5,8	3,6	3,5

En la Tabla 9 se presentan las distancias de aproximación exigidas por el RETIE para corriente continua.

Tabla 9 Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente continua (Tabla 13.8 RETIE)

Tensión nominal del sistema	Límite de aproximación seguro [m]		Límite de aproximación restringida [m] Incluye movimientos involuntarios	Límite de aproximación técnica [m]
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta		
100 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto	Evitar contacto
301 V – 1 kV	3,0	1,0	0,3	25 mm
1,1 V – 5 kV	3,0	1,5	0,5	0,1
5,1 kV – 15 kV	3,0	1,5	0,7	0,2
15,1 kV – 45 kV	3,0	2,5	0,8	0,4
45,1 kV – 75 kV	3,0	2,5	1,0	0,7
75,1 kV – 150 kV	3,3	3,0	1,2	1,0
150,1 kV – 250 kV	3,6	3,6	1,6	1,5
250,1 kV – 500 kV	6,0	6,0	3,5	3,3
500,1 kV – 800 kV	8,0	8,0	5,0	5,0

Las distancias de seguridad también se pueden calcular de acuerdo a las ecuaciones vistas en el Capítulo 2: Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma NFPA 70E y Ecuaciones para el cálculo de los límites de protección con la norma IEEE 1584. El RETIE 2013 solo exige cumplir las distancias de seguridad de la

Tabla 8 y la Tabla 9, en la Figura 12 se puede observar de forma gráfica una adaptación de lo descrito por el RETIE.

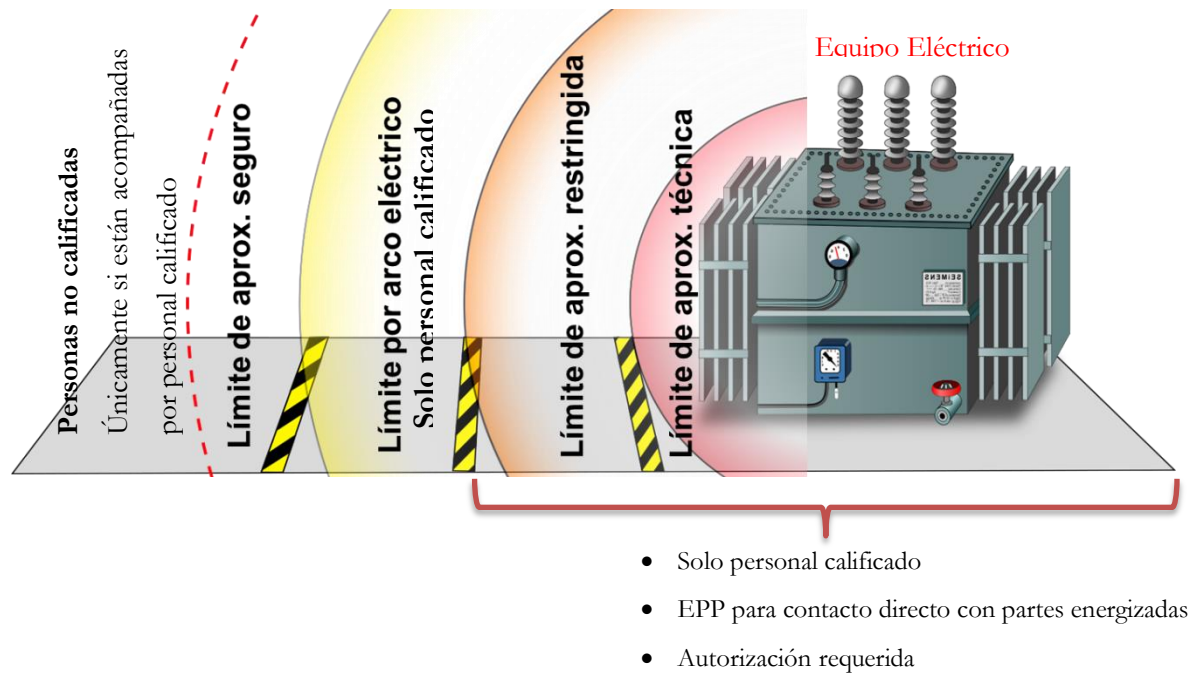


Figura 12 Distancias de seguridad, adaptado del Artículo. 13.4 del RETIE 2013.

Después de marcar las distancias de seguridad de trabajo, para completar los requisitos exigidos por en el Artículo 13.4 del RETIE 2013, se debe fijar etiquetas en el equipo eléctrico donde se indique el nivel de riesgo y el EPP requerido para sobrepasar el límite de aproximación técnica. Por tanto, la última opción para disminuir el riesgo por arco eléctrico es mediante la protección de la persona con el EPP adecuado.

4.3 Protección del usuario

Equipo de protección personal

De acuerdo a la norma NFPA 70E y al RETIE 2013, al realizar trabajos en o cerca a partes energizadas el personal debe contar con los EPP adecuados y certificados para el trabajar en el nivel de tensión o energía incidente calculada, los cuales no deben tener un nivel de protección menor al establecido por la Tabla 13.6 del RETIE 2013 adaptada de la norma NFPA 70E, en la Tabla 10 Equipo de protección personal Tabla 13.6 del RETIE 2013. Tabla 10 se puede observar el EPP dependiendo del valor de la energía

incidente [25][26].

Tabla 10 Equipo de protección personal Tabla 13.6 del RETIE 2013.

Categoría EPP	Nivel mínimo de protección cal/cm²
0	Prenda normal de algodón
1	4
2	8
3	25
4	40

Cada nivel de categoría del EPP tiene definido su vestuario dependiendo del valor de la energía incidente, siendo la categoría 0 la protección más baja y la categoría 4 la más exigente, a continuación se describe el vestuario de cada categoría de acuerdo a la Tabla 130.7(C)(16) de la norma NFPA 70E [27][28].

Categoría 0

El vestuario para la categoría 0 no está definida en la norma NFPA 70E, sin embargo el RETIE 2013 exige usar prendas de algodón, casco y botas de seguridad.

Categoría 1 (Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima del arco de 4 cal/cm²)

- Camisa y pantalón de manga larga con clasificación de arco.
- Pantalla frontal con clasificación de arco (los escudos faciales deben tener una protección envolvente para proteger no solo la cara, sino también la frente, las orejas y el cuello, o alternativamente, se requiere usar una capucha con protección de arco eléctrico) o campana de arco con capucha.
- Chaqueta, parca, impermeable o forro de casco resistente al arco (**opcional**).

Equipo de protección

- Casco de seguridad.
- Gafas de seguridad (**requerido**).
- Protección auditiva (inserciones del conducto auditivo).
- Guantes de cuero resistentes (si se usan guantes aislantes de caucho con

protectores de cuero, no se requieren guantes adicionales de cuero o con clasificación de arco. La combinación de guantes aislantes de caucho con protectores de cuero satisface el requisito de protección contra arco eléctrico.).

- Botas de seguridad (**opcional**). En la Figura 13 se puede observar el EPP que la persona cuando la energía incidente es menor a 4 cal/cm².

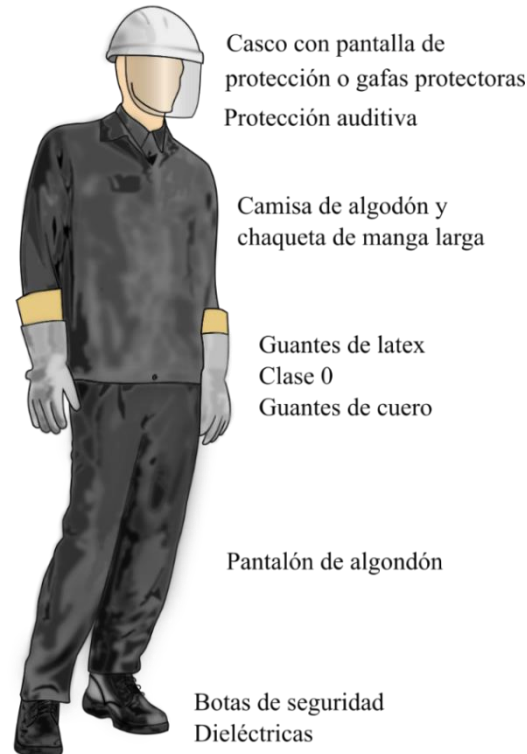


Figura 13 Equipo de protección personal categoría 1

Categoría 2 (Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima del arco de 8 cal/cm²)

- Camisa y pantalón de manga larga con clasificación de arco.
- Caperuza del traje de flash con clasificación de arco o careta con clasificación de arco y pasamontañas con clasificación de arco.
- Chaqueta, parca, impermeable o forro de casco resistente al arco (**opcional**).

Equipo de protección

- Casco de seguridad.
- Gafas de seguridad (requerido).
- Protección auditiva (inserciones del conducto auditivo).
- Guantes de cuero resistentes.
- Botas de seguridad.

En la Figura 14 se puede observar el EPP que la persona cuando la energía incidente es menor a 8 cal/cm^2 .



Figura 14 Equipo de protección personal categoría 2

Categoría 3 (Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima del arco de 25 cal/cm^2)

- Camisa de manga larga con clasificación de arco (según sea necesario).
- Pantalón con clasificación de arco (según sea necesario).
- Overol con clasificación de arco (según sea necesario).
- Chaqueta con protección de arco (según sea necesario).

- Pantalones de traje de arco con clasificación de arco (*según sea necesario*).
- Caperuza del traje de flash con clasificación de arco.
- Guantes con clasificación de arco.
- Chaqueta, parca, impermeable o forro de casco resistente al arco (*opcional*).

Equipo de protección

- Casco de seguridad.
- Gafas de seguridad (*requerido*).
- Protección auditiva (inserciones del conducto auditivo).
- Botas de seguridad.

En la Figura 15 se puede observar el EPP que la persona cuando la energía incidente es menor a 25 cal/cm^2 .

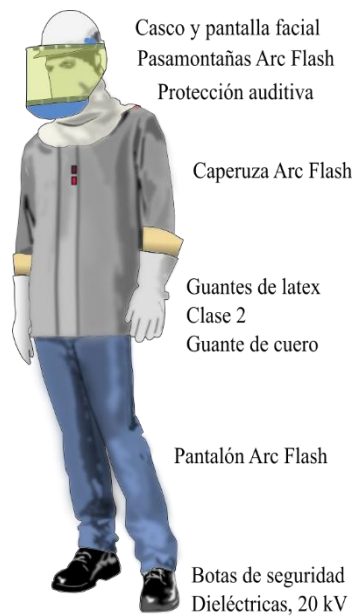


Figura 15 Equipo de protección personal categoría 3

Categoría 4 (Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima del arco de 40 cal/cm^2)

- Camisa de manga larga con clasificación de arco (*según sea necesario*).
- Pantalón con clasificación de arco (*según sea necesario*).

- Overol con clasificación de arco (según sea necesario).
- Chaqueta con protección de arco (según sea necesario).
- Pantalones de traje de arco con clasificación de arco (según sea necesario).
- Caperuza del traje de flash con clasificación de arco.
- Guantes con clasificación de arco.
- Chaqueta, parca, impermeable o forro de casco resistente al arco (opcional).

Equipo de protección

- Casco de seguridad.
- Gafas de seguridad (requerido).
- Protección auditiva (inserciones del conducto auditivo).
- Botas de seguridad.

En la Figura 16 se puede observar el EPP que la persona cuando la energía incidente es menor a 40 cal/cm².



Figura 16 Equipo de protección personal categoría 4

Los guantes dieléctricos se seleccionan de acuerdo al nivel de tensión: los guantes Clase 0 se debe utilizar para tensiones hasta 500 V a.c., los guantes Clase 1 hasta 1.000 V

a.c., los guantes Clase 2 se deben utilizar para tensiones hasta 17.000 V a.c., los Clase 3 hasta 25.000 V a.c., los clase 4 hasta 36.000 V a.c.

A medida que se aumenta la energía incidente se aumenta la rigurosidad del EPP del trabajador, el cual pierde movilidad y agilidad al momento de realizar los trabajos aumentando la probabilidad generar arcos eléctricos por toques involuntarios. Por tanto, se debe asegurar que el análisis de la energía incidente sea el correcto y el adecuado para cada situación estudiada [17][27].

Herramientas y equipos aislados

Para evitar el riesgo por arco eléctrico se debe asegurar que al momento de trabajar dentro del límite de aproximación técnica se utilicen herramientas aisladas, debido que se pueden realizar contactos accidentales con conductores eléctricos o partes de circuito del equipo [5][28]. Los requisitos que se deben tener en cuenta para las herramientas aisladas son los siguientes:

- Ser clasificadas para los voltajes en los que se usan.
- Diseñarse y construirse para el entorno al que están expuestas y la manera en que se utilizan.
- Se deben verificar antes de cada uso. La inspección buscará daños en el aislamiento o daño que puede limitar el correcto funcionamiento de la herramienta.

Como se observó anteriormente al implementar mecanismos para disminuir el riesgo por arco eléctrico en la fuente, canal y persona, se puede reducir en un gran porcentaje las consecuencias al momento de una ocurrencia. Sin embargo, es importante que cada empresa cumpla con procedimientos al momento de ejecutar trabajos en lugares energizados tal como lo exige el RETIE 2013. Uno de los requisitos de los procedimientos es calcular la energía incidente ya sea con la norma NFPA 70E o la norma IEEE 1584, por tanto, en el siguiente capítulo se va a realizar un ejercicio de aplicación, el cual permitirá comparar el valor de la energía incidente calculado con ambas normas y así conocer sus diferencias.

4.4 Resumen

El análisis de la energía incidente se implementa para disminuir el riesgo por arco eléctrico dentro de las industrias o en lugares donde se tenga acceso a equipos eléctricos. Para ello, la ingeniería actual se centra en implementar nueva tecnología para disminuir el riesgo a través de la fuente del arco, mediante las distancias de trabajo se disminuye a través del canal y por medio EPP se disminuye mediante la protección de la persona, las prácticas utilizadas son las siguientes:

- **Fuente**

Coordinación de protecciones

La función de la coordinación de protecciones es eliminar la falla en menos de 0,15 segundos, asegurando que los conductores puedan soportar la corriente de falla asimétrica. Por tanto, después de determinar el valor de la corriente asimétrica, se debe seleccionar la protección adecuada que despeje la falla aguas arriba del equipo, en la actualidad los fabricantes tienen una gran variedad de protecciones que permiten asegurar el tiempo de despeje de la falla.

Celdas modulares

Las protecciones de las celdas modulares al momento de detectar una falla actúan y realizan la extinción del arco dentro de la celda. En la actualidad esta tecnología es una de las más utilizadas ya que se tiene mayor seguridad al momento de realizar maniobras con la carga conectada puesto que el arco eléctrico se genera dentro de la celda.

- **Canal**

Distancias de seguridad

Al alejar la persona lo más posible de la fuente del arco, se disminuye en un gran porcentaje las consecuencias que puede llegar a tener la persona. En Colombia para disminuir el riesgo por arco eléctrico lo hace a través RETIE, estableciendo el límite de aproximación restringida, el cual se debe delimitar mediante una franja que impida el acceso a personas sin el EPP adecuado.

- **Equipo de protección personal**

Debido al peligro que se está expuesto el personal al momento de realizar actividades cerca a partes energizadas, el personal debe contar con el EPP adecuado para soportar la energía incidente a la que puede estar expuesto. El EPP se debe seleccionar de acuerdo al valor de la energía incidente, siendo la categoría 0 la menos exigente y la categoría 4 la más exigente.

Diferencias entre las normas

- La norma IEEE 1584 no describe el vestuario que debe utilizar la persona de acuerdo al valor de la energía incidente, solo se puede encontrar dentro de la norma las ecuaciones para el cálculo de la energía incidente. La norma NFPA 70E describe detalladamente todo el vestuario que debe utilizar la persona (Tabla 130.7 (C)(16) NFPA 70E) y las ecuaciones para calcular la energía incidente.
- La norma IEEE 1584 y la norma NFPA70E establecen las mismas distancias de trabajo las cuales dependen del nivel de tensión y de las características del equipo a analizar. Sin embargo, la norma NFPA 70E, establece otros límites de seguridad: límite de aproximación restringida, límite de aproximación técnica y límite de aproximación segura, dichos límites dependen del nivel de tensión y el tipo de corriente (continua, alterna).

CAPÍTULO 5

EJERCICIO DE APLICACIÓN

En este capítulo se pretende calcular la energía incidente y el EPP de un sistema radial simple con la norma NFPA70E y la norma IEEE 1584. Se tendrán diferentes escenarios en los cuales se variarán características del circuito, esto con el fin de observar el comportamiento que tiene cada norma a las mismas condiciones de estudio.

5. EJERCICIO DE APLICACIÓN

PARA comparar la norma IEEE 1584 y la norma NFPA 70E es necesario calcular la energía incidente con cada una de las normas con las mismas condiciones, para ello, se deben implementar diferentes escenarios de simulación variando la tensión, potencia del transformador, distancias de trabajo y tiempo de despeje de la falla.

Para realizar los escenarios de simulación se analizará una parte del sistema eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, el diagrama unifilar será implementado en el programa de simulación ETAP, en donde se calculará la energía incidente con cada una de las normas en dos casos de estudios, uno en baja tensión (BT) y otro en media tensión (MT).

5.1 Caso de estudio

A continuación se presenta en la Figura 17 se presenta el diagrama unifilar del sistema radial que se utilizará para realizar el análisis del arco eléctrico con las dos normas. A continuación se da a conocer los parámetros generales del caso de estudio:

- Potencia del generador: 10 MVA
- Tensión del primario (Barra de media tensión): 13,2 kV
- Tensión del secundario (Barra de baja tensión): 0,220 kV
- Calibre del conductor 1: 500 kcmil
- Calibre del conductor 2: 4 AWG
- Tiempo de duración del arco: 0,04 s a 0,2 s
- El sistema cuenta con puesta a tierra

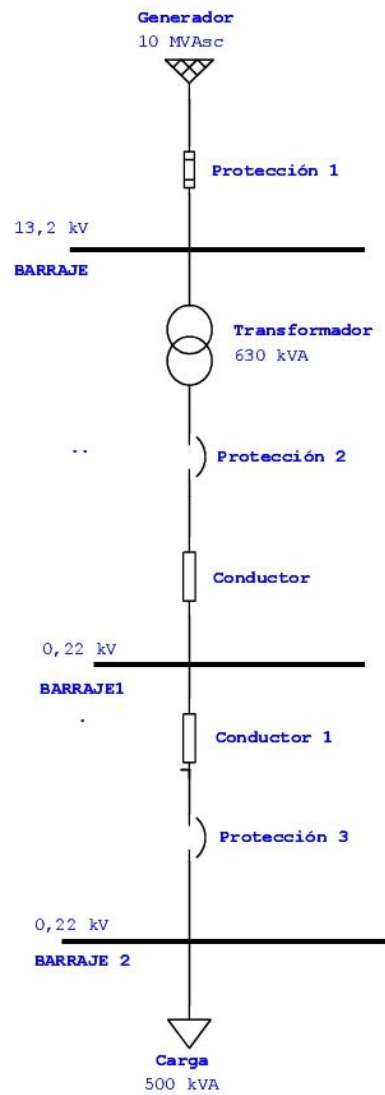


Figura 17 Diagrama unifilar del caso de estudio

5.2 Objetivo del caso de estudio

El objetivo general del caso de estudio, es realizar un análisis comparativo de la energía incidente calculada con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 y de esta manera determinar las diferencias, ventajas y desventajas de cada una, para cumplir este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Utilizar el programa SARE para calcular la corriente de cortocircuito y a partir de allí la energía incidente con la norma NFPA 70E y la IEEE 1584.
- Comparar la energía incidente de ambas normas en los diferentes escenarios de simulación: variando las potencias del transformador, variando la tensión del secundario, variando las distancias de trabajo y por último variando el tiempo de despeje de la falla.
- Visualizar gráficamente la tendencia de la energía incidente que tiene la norma IEEE 1584 y la norma NFPA 70E.
- Por último, identificar y concluir acerca de las diferencias de cada norma, analizadas en cada uno de los escenarios.

5.3 Desarrollo del caso de estudio en BT

El primer paso para realizar el análisis de la energía incidente es calcular la corriente de cortocircuito, para el caso de BT se va a realizar un fallo trifásico simétrico en el BARRAJE1 y a partir de allí se determinará el tiempo de despeje de la falla, el tiempo depende de la protección seleccionada lo cual se hace mediante el análisis de coordinación de protecciones, teniendo en cuenta la corriente de cortocircuito y el tiempo de despeje mínimo establecido por las normas (ver Tabla 7 del capítulo 4). La norma IEEE 1584 recomienda calcular el tiempo de despeje de la falla mediante un software especializado, para ello, se va a implementar y simular el circuito del sistema en el programa ETAP ver Figura 18.

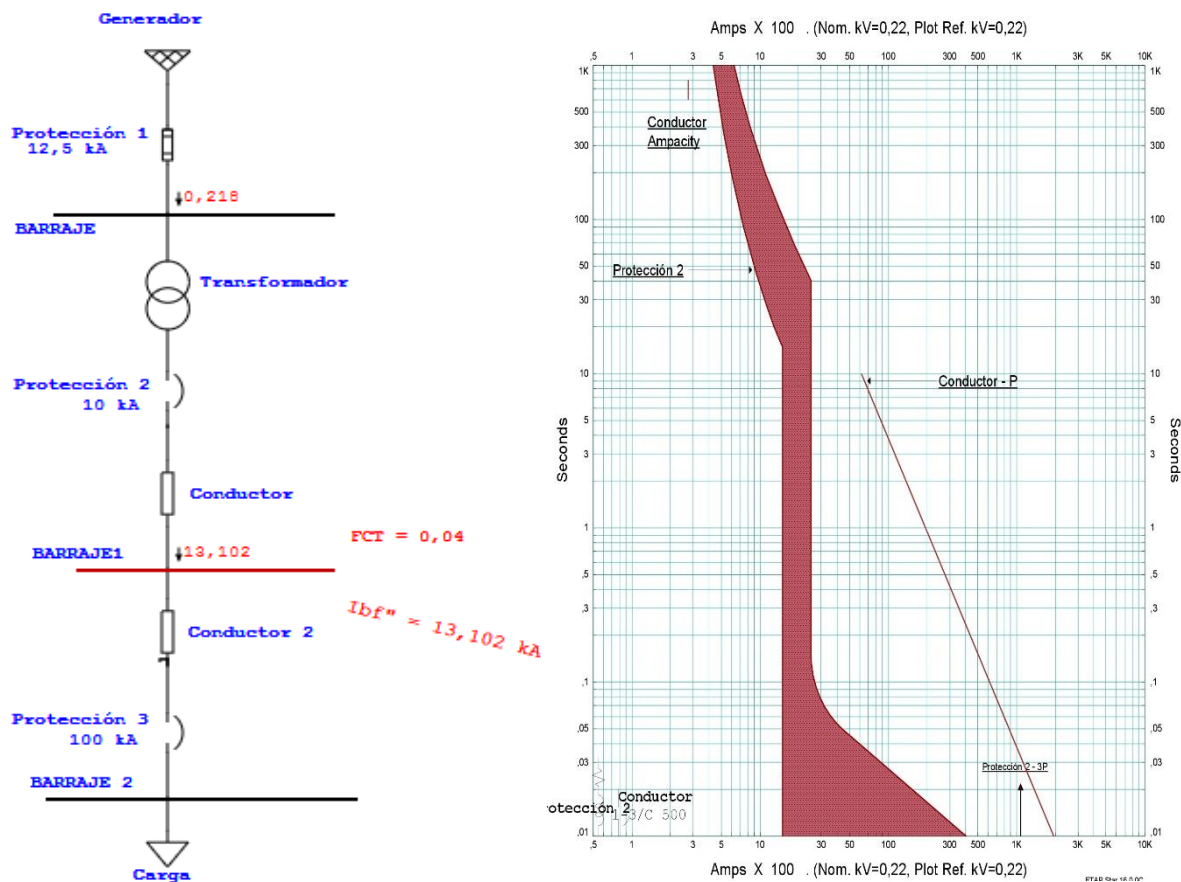


Figura 18 Sistema radial simple implementado en el software ETAP

Como se observa en la Figura 18, al realizar el fallo trifásico en el BARRAJE2 la protección 2 despeja la falla en un tiempo de 0,04 s, actuando antes de los límites de la

curva del correcto funcionamiento del conductor, garantizando que el aislamiento de los conductores no se va a ver afectado por la corriente de cortocircuito de la falla. Con los datos obtenidos anteriormente, lo siguientes es realizar el análisis de la energía incidente.

Análisis de la energía incidente

Para realizar un análisis completo de la energía incidente se van a realizar diferentes escenarios de simulación, en la Tabla 11 se puede observar las características iniciales del caso de estudio y los parámetros que se varían cada uno escenarios presentes.

Tabla 11 Escenarios a evaluar en BT

Características iniciales del caso de estudio: Potencias de los transformadores: 225 kVA a 10.000 kVA Tensión del transformador: 13,2 kV/0,220 kV Distancia de trabajo: 455 mm Distancia entre electrodos: 13 mm Tiempo aproximado de despeje falla: 0,04 s Tipo de arco: En caja Cuenta con SPT: Sí	
Escenario 1, parámetros que varían Distancia de trabajo: 455 mm - 610 mm	Escenario 2, parámetros que varían Distancia electrodos: 13 mm - 32 mm
Escenario 3, parámetros que varían Tiempo de despeje falla: 0,04 s - 0,2 s	Escenario 4, parámetros que varían Tensión del secundario: Varía desde 220 V hasta 1320 V Potencia del transformador: 1000 kVA Tiempo de despeje de la falla: 0,2 s

Resultados primer escenario:

Como se mencionó anteriormente una de las maneras para disminuir los riesgos por arco eléctrico es aumentar la distancia de trabajo, por tanto, el primer escenario consiste en determinar la energía incidente a una distancia de 455 mm y después a 610 mm.

Como se observa en la Figura 19 para el primer escenario el valor de la energía incidente es mayor al calcularla con la norma NFPA 70E que al ser calculada con norma IEEE 1584, esto se debe a los pocos datos que requiere la norma NFPA 70E para determinar la energía incidente.

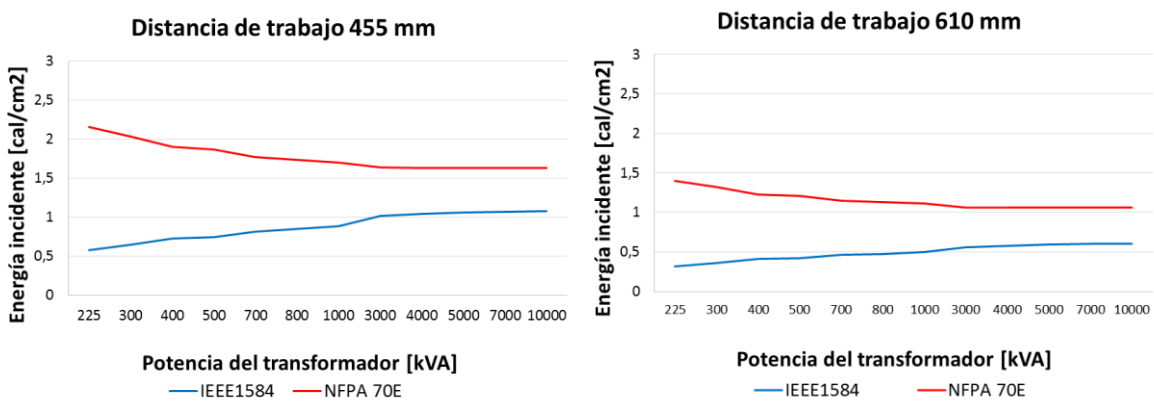


Figura 19 Resultados primer escenario

De la Figura 19, se puede observar también que al aumentar la distancia de trabajo la energía incidente disminuye, para el caso de la norma NFPA 70 la energía incidente se disminuye en un 65%, mientras que para la norma IEEE 1584 disminuye un 56%, concluyendo que la energía incidente es inversamente proporcional a la distancia de trabajo.

Resultados segundo escenario:

El segundo escenario consiste en determinar la energía incidente al aumentar la distancia entre los electrodos del equipo de 13 mm a 32 mm. Como se observa en la Figura 20 la energía incidente al ser calculada con la norma NFPA 70E no varía al aumentar la distancia de los electrodos, mientras que con norma IEEE 1584 la energía incidente en promedio disminuye un 78%; entre mayor sea la distancia entre los conductores menor será la energía incidente, por este motivo para disminuir el riesgo por

arco eléctrico se debe considerar la distancia adecuado para prevenir que la rigidez del aire se rompa y produzca un cortocircuito.

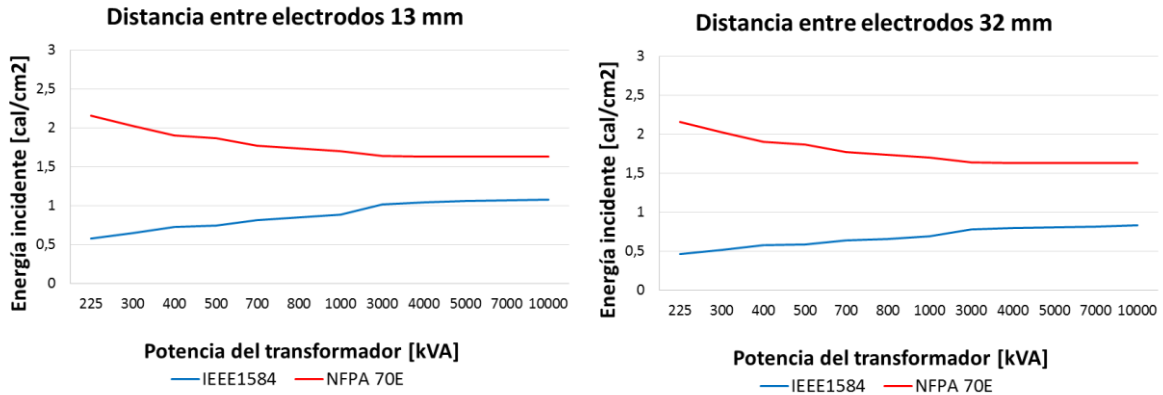


Figura 20 Resultados segundo escenario

De acuerdo a lo anterior, al variar la distancia de los electrodos se está variando una característica física de la formación del arco, por tanto, el espacio entre los electrodos se convierte en una columna de plasma permitiendo aumentar o disminuir la corriente de arco (visto en el capítulo 3). Sin embargo, es de aclarar que la energía incidente no varía al ser calculada con la norma NFPA 70E, ya que dentro de sus ecuaciones solo tienen en cuenta la corriente de cortocircuito, la distancia de trabajo y el tiempo de despeje de la falla.

Resultados tercer escenario:

El tercer escenario consiste en aumentar el tiempo de despeje de la falla de 0,04 s a 0,2 s, obteniendo en los dos casos la mayor energía incidente con la norma NFPA 70E mismo análisis de los escenarios anteriores.

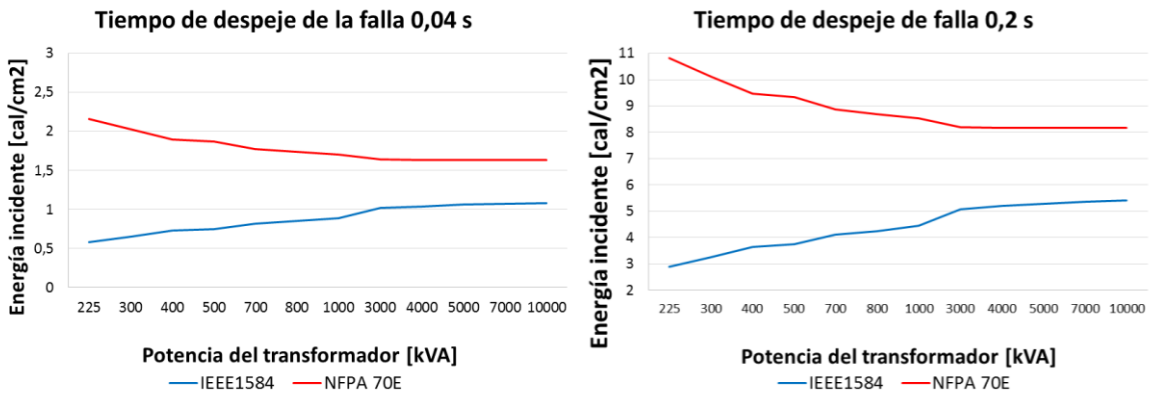


Figura 21 Resultados tercer escenario

De la Figura 21 se puede concluir que al aumentar el tiempo de despeje de la falla en 0,16 s la energía incidente aumenta 5 veces con ambas normas (NFPA 70E e IEEE 1584), siendo el tiempo de despeje de la falla directamente proporcional a la energía incidente, considerando que con un tiempo mayor de exposición al arco se pueden ocasionar quemaduras alrededor del tercer grado o en algunos casos la muerte [29][30].

Resultados cuarto escenario:

En el cuarto escenario, se calcula la energía incidente de un transformador de 1000 kVA, variando la tensión del secundario desde 220 V hasta 13200 V y con un tiempo de despeje de la falla igual a 0,2 s. De la Figura 22 se puede analizar que el valor de la energía incidente es mayor con la norma NFPA 70E a tensiones desde 220 V hasta 400 V (Círculo rojo), mientras que a partir de los 400 V hasta los 1000 V (Círculo azul) el valor de la energía incidente es mayor con la norma IEEE 1584, esto se debe que a partir de la tensión de 1000 V la norma IEEE 1584 cambia la ecuación de análisis. También se puede observar que la norma NFPA 70E tiene una pequeña variación cuando se tiene una tensión de 600 V, esto sucede debido que la norma cambia la ecuación para calcular el valor de la energía incidente.

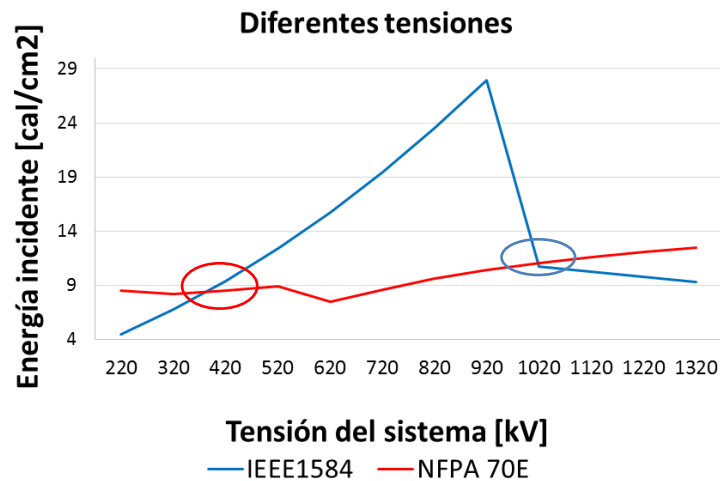


Figura 22 Resultados cuarto escenario

Como se observó a lo largo del caso de estudio de BT, en la mayoría de los escenarios la norma NFPA 70E es más conservadora que la norma IEEE 1584, sin embargo, como se observa en el último escenario la energía incidente es mayor con la norma IEEE 1584 en tensiones desde 400 V a 1000 V.

5.4 Desarrollo del caso de estudio en MT

Para el caso de estudio en Media Tensión (MT), se va a simular un fallo trifásico en la primer barra (ver la Figura 18), a continuación en la

Tabla 12, se observan los parámetros para el análisis del caso de MT.

Tabla 12 Escenarios a evaluar en MT

Características del caso de estudio

Tiempo del primario: Varía desde 6 kV hasta 17 kV

Tiempo de despeje de la falla: 0,185 s

Potencia del generador: 20 MVA

Distancia de trabajo: 455 mm

Distancia electrodos: 104 mm

Tipo de arco: En caja

Cuenta con SPT: Sí

En la Figura 23 se calcula la energía incidente del sistema variando las tensiones, concluyendo que para tensiones entre los 6 kV y los 15 kV en promedio la energía incidente es 13 veces mayor al ser calculada con la norma NFPA 70E que con la norma IEEE 1584. Para el caso de tensiones superiores a los 15 kV la energía incidente es igual para ambas normas, debido que la norma utiliza la ecuación de Ralph Lee para tensiones superiores a los 15 kV, mientras que la norma NFPA 70E emplea la ecuación de Ralph Lee para tensiones superiores a los 600 V.

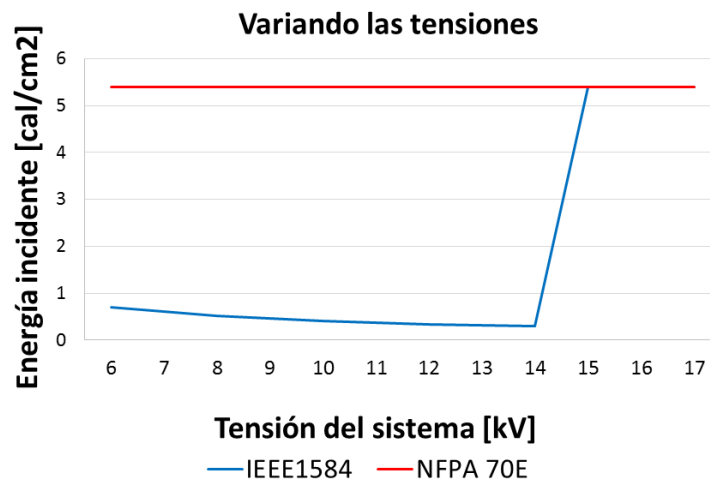


Figura 23 Cálculo de la energía incidente variando diferentes tensiones en la barra de MT.

El comportamiento de la energía incidente para el caso de MT es similar para al caso en BT, por tanto el análisis es similar. Como conclusión del capítulo se puede observar que en la mayoría de los escenarios de simulación la energía incidente es mayor al ser calcula con la norma NFPA 70E y para el caso de MT su diferencia es mucho mayor, esto afecta directamente en el equipo de protección personal que debe utilizar la persona, al momento de realizar cualquier tipo de actividad.

5.5 Resumen

Se implementó en el programa de simulación ETAP una parte del diagrama unifilar del sistema eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. A partir de allí, se realizó el primer caso de estudio de BT, el cual cuenta con cuatro escenarios de simulación definitivos mediante la variación de algunas características propias del sistema. El segundo caso de estudio se realizó de MT, el cual cuenta con un escenario de simulación.

Diferencias entre las normas

- En tres escenarios de simulación del caso de estudio de BT, la energía incidente es 2,5 veces mayor al ser calculada con las ecuaciones de la norma NFPA 70E que con las ecuaciones de la norma IEEE 1584. Esto debido que la norma NFPA70E no tiene en cuenta algunas variables que afectan la naturaleza y conformación del arco (distancia entre electrodos, SPT, protecciones).
- En el cuarto escenario del caso de estudio de BT, la energía incidente es mayor entre las tensiones 0,220 kV y 0,400 kV con la norma NFPA70E, entre las tensiones 0,400 kV a 1 kV la energía incidentes es mayor con la norma IEEE1584 y a partir de 1 kV le tensión es mayor con la norma NFPA70E. El único escenario en donde la energía incidente es mayor al ser calculada con la norma IEEE1584 es entre las tensiones 0,400 kV a 1 kV, su explicación se debe que para tensiones menores a 1 kV la norma IEEE1584 tiene en cuenta la tensión dentro de su ecuación, mientras que la norma NFPA70E no tiene en cuenta dicho parámetro. Por tanto, la energía incidente es proporcionalmente a la tensión para tensiones menores a 1 kV.
- En el caso de MT la energía incidentes es 13 veces mayor con la norma NFPA 70E al ser comparada con la norma IEEE1584, esto ocurre que para tensiones mayores a 0,600 kV, ya que la norma NFPA70E utiliza la misma ecuación que utiliza la norma IEEE1584 para tensiones mayores a 15 kV, por tanto, la norma NFPA 70E tiende a ser más rigurosa para sistemas de MT.

CAPÍTULO 6

MARCO COMPARATIVO ENTRE EL PROGRAMA ETAP Y EL PROGRAMA SARE

En este capítulo se pretende comparar validar el funcionamiento del programa SARE con el programa ETAP, para realizar la comparación se van a implementar diferentes escenarios de simulación en donde se calcular la corriente de cortocircuito, la corriente de arco y la energía incidente y de esta manera obtener la diferencia entre los programas.

6. MARCO COMPARATIVO ENTRE EL PROGRAMA SARE Y EL PROGRAMA ETAP

Despues de comparar la energía incidente en el capítulo anterior con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584, en este capítulo se plantea la creación de un programa en Excel llamado “Simulación del Arco Eléctrico – SARE”, que permita calcular la energía incidente de una forma didáctica y fácil de utilizar.

Para verificar el funcionamiento del programa SARE se decidió compararlo con el programa ETAP, para ello se van a realizar diferentes escenarios de simulación, en donde se compara la corriente de cortocircuito, corriente de arco eléctrico y la energía incidente calculados con ambos programas, se aclara que el programa ETAP solo calcula la energía incidente con la norma IEEE 1584.

6.1 Funcionamiento del programa SARE

El programa SARE permite calcular la energía incidente de un circuito radial simple de tres barras, permitiendo variar la tensión, potencia del transformador, tiempo de despeje de la falla, distancia entre barras, calibres de los conductores, distancia de trabajo, distancia de electrodos y tipo de arco, en la Figura 24 (a) se puede observar el circuito definido en el programa SARE.

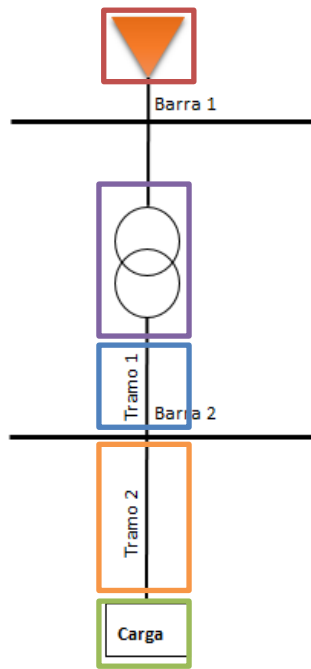


Figura 24 (a) Circuito definido en el programa SARE.

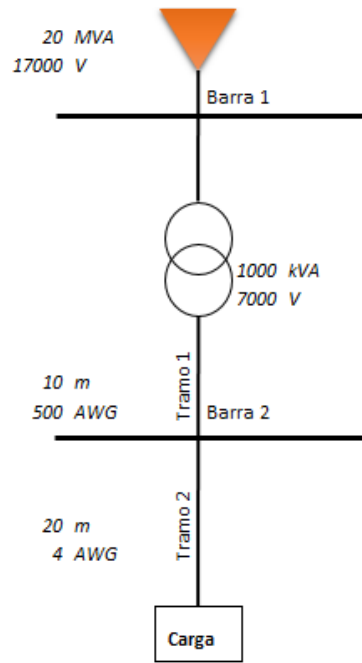


Figura 24 (b) Resultados del programa SARE.

En la Figura 24 (a) se observa la configuración del circuito radial simple, el cual consiste en los siguientes elementos: en el recuadro de color rojo está ubicado el generador unido a una barra, aguas abajo del generador se encuentra el transformador (recuadro color morado) seguido de una línea que conecta el transformador y otra barra (recuadro color azul), después se encuentra una segunda línea (recuadro color naranja) que va desde una barra hasta la carga (recuadro color verde), el programa permite calcular la energía incidente y el EPP en las tres barras y en la carga. En la Figura 24 (b), se puede observar la interfaz de los resultados del circuito después de ingresar los valores del sistema.

Metodología del programa SARE para determinar la energía incidente:

En la Figura 25 se puede observar el diagrama de flujo del funcionamiento del programa SARE para determinar la energía incidente.

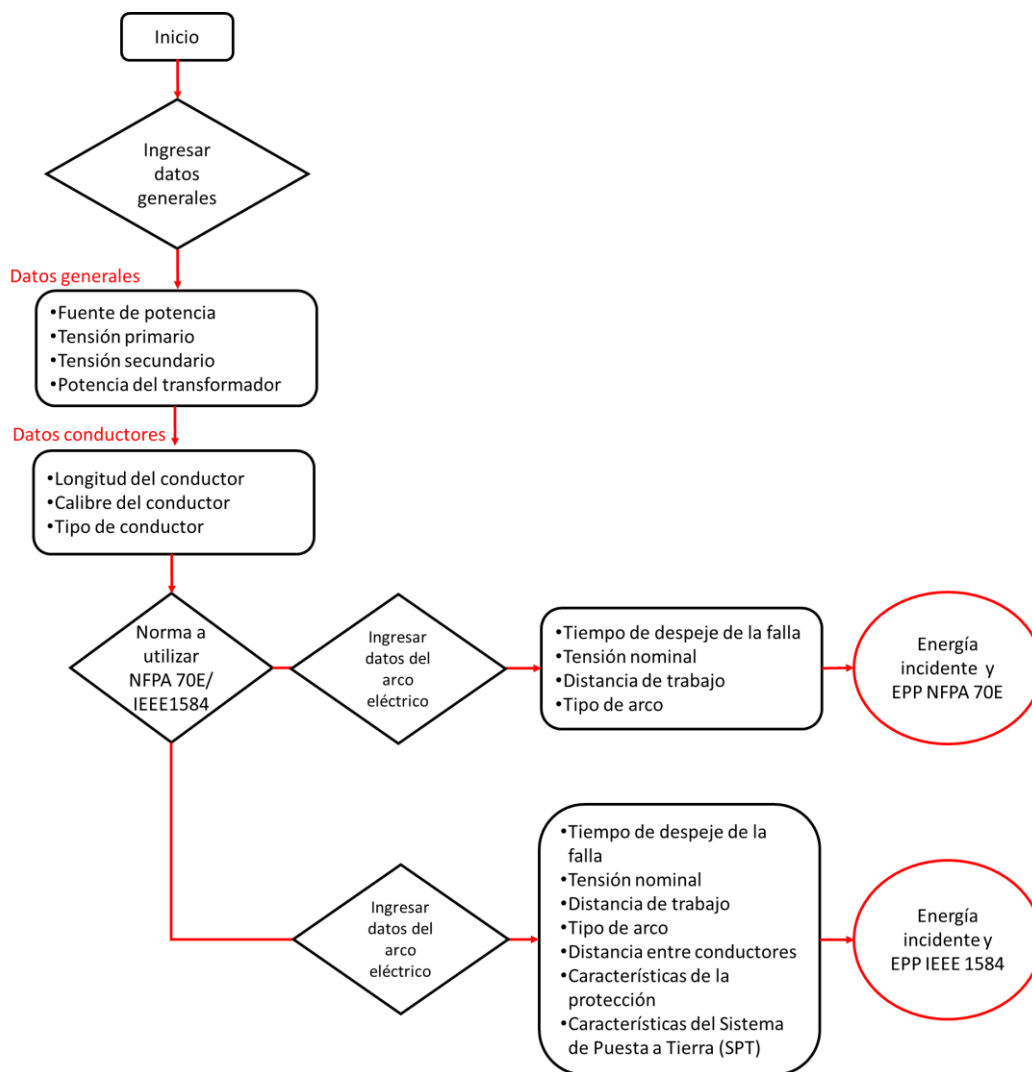


Figura 25 Diagrama unifilar del funcionamiento del programa SARE.

Los pasos a seguir para calcular la energía son: 1) Se debe ingresar el valor de la fuente de potencia (MVA), tensión del primario (kV), tensión del secundario (V) y la potencia del transformador (kVA), a partir de estos valores el programa calcula el valor de las

impedancias normalizadas del transformador. En la Figura 26 se puede observar el campo para ingresar los datos generales del sistema.

Datos generales del sistema		
Fuente de potencia	20	MVA
Tensión primario	17	kV
Tensión secundario	7000	V
Potencia trafo	1000	kVA
Carga Estática	1000	kW
Impedancias normalizadas		
Z%	4,6	
Z _t	2254,00	Ω
R _t	210,700	Ω
X _t	2244,13	Ω
$\frac{R_t}{X_t}$	0,09	

Figura 26 Campo utilizado para ingresar los datos generales del sistema

2) El segundo paso consiste en ingresar los datos característicos de las líneas del circuito radial simple, teniendo en cuenta la distancia del conductor en (m), el calibre del conductor (AWG) y por último el tipo de conductor (unipolar o multipolar) a partir de estos valores el programa calcula las impedancias de las líneas, ver Figura 27.

Tramo 1		
L1	10	m
Conductor	500	AWG
Tipo conductor	Unipolar	
Impedancias del conductor		
Z _t	1,49	mΩ
R _t	0,89	mΩ
X _t	1,20	mΩ
Tramo 2		
L2	20	m
Conductor	4	AWG
Tipo conductor	Unipolar	
Impedancias del conductor		
Z _t	21,42	mΩ
R _t	21,29	mΩ
X _t	2,40	mΩ

Figura 27 Campo utilizado para ingresar los datos de las líneas

3) El tercer paso consiste en seleccionar la norma para realizar el análisis de la energía incidente, si se selecciona la norma NFPA 70E se debe ingresar el tiempo de despeje de la falla (s) y la distancia de trabajo (mm). Ahora bien, si la opción es la norma IEEE 1584, se deben ingresar algunas características adicionales del sistema, como el tipo de arco, distancia entre electrodos y la existencia o no del sistema de puesta a tierra. El programa SARE permite hacer la selección de algunas características mediante una lista desplegable, las opciones se presentan son:

- Tipo de arco: Arco encapsulado y arco abierto.
- Distancia de los electrodos: Interruptores de 15 kV (152 mm), Interruptores de 5 kV (104 mm), Interruptores de BT (32 mm), MCC's (25 mm) y Conductores (13 mm).
- Sistema de puesta a tierra: Con sistema de puesta a tierra y sin sistema de puesta a tierra.

Para determinar la energía incidente con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584 se debe determinar previamente la corriente de cortocircuito simétrica; el programa SARE calcula la corriente de cortocircuito simétrica y asimétrica. En la Figura 28 se puede observar el campo utilizado para ingresar los datos del arco eléctrico.

Datos del arco eléctrico			
NORMA A UTILIZAR: NFPA 70E <input checked="" type="checkbox"/>		IEEE 1584 <input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de arco	Arco caja	Tiempo despeje falla	0,185 s
Distancia electrodos	Interruptores 5 kV	Distancia de trabajo	450 mm
Sistema de puesta a tierra	Con SPT	Tipo de corriente	Simetrica

Figura 28 Campo utilizado para ingresar los datos del arco eléctrico.

4) En el cuarto paso se debe seleccionar el punto dónde se va a realizar el análisis de la energía incidente, ya sea en la barra número uno, número dos o en la carga, inmediatamente después de seleccionar la barra, se presenta el valor de la energía incidente, la corriente de cortocircuito y el EPP adecuado para el nivel de la energía incidente calculada. A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de la energía incidente de una falla en la barra número uno.

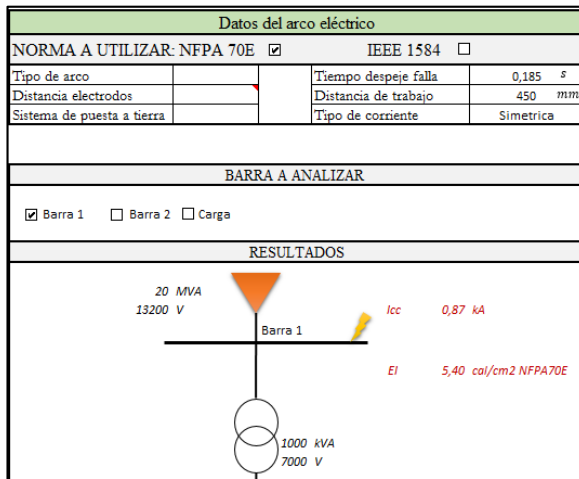


Figura 29 (a) Resultados de la energía incidente con la norma NFPA 70E.

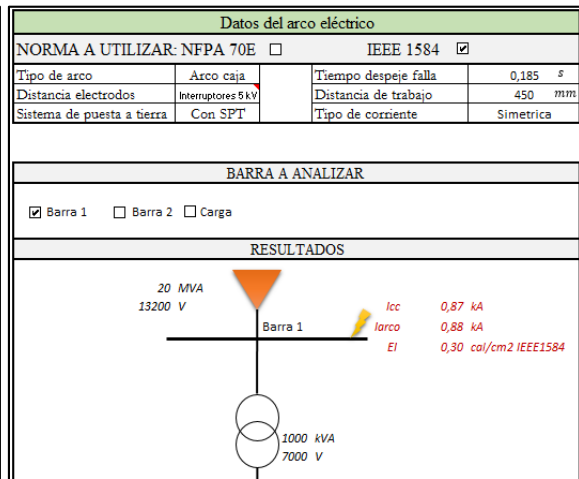


Figura 29 (b) Resultados de la energía incidente con la norma IEEE 1584.

En la Figura 29 (a) se hizo el análisis con la norma NFPA 70E obteniendo como resultado la corriente de cortocircuito y la energía incidente en la barra analizada. En la Figura 29 (b), se hizo el análisis con la norma IEEE 1584 teniendo como resultado la corriente de cortocircuito, la corriente de arco y la energía incidente. Igualmente el programa SARE permite visualizar la representación del EPP, en la Figura (a) se observa el análisis con la norma NFPA 70E y en la Figura (b) se observa el análisis con la norma IEEE 1584.



Figura 30 (a) EPP con la norma NFPA 70E.

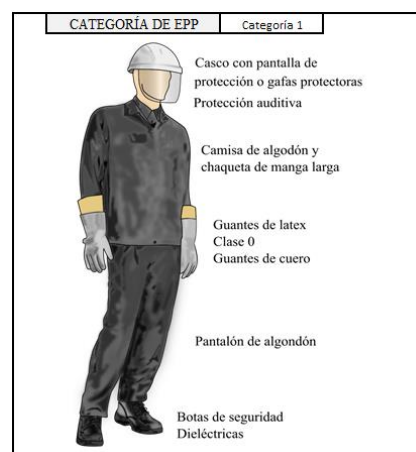


Figura 30 (b) EPP con la norma IEEE1584.

5) El último del análisis de la energía incidente se hace en la etiqueta de resultados, en

la Figura 30 (a) se observa la etiqueta del ejemplo con la norma NFPA 70E y en la Figura 30 (b) se observa el análisis con la norma IEEE 1584.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	0,87	kA
Energía incidente	5,40	cal/cm²
Distancia de trabajo	450	mm
EPP requerido	Categoría 2	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,45	m
Método de cálculo:	Norma NFPA 70E	
	Fuera de límites de la norma NFPA 70E- Se utiliza fórmula Ralph Lee	

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	0,87	kA
Energía incidente	0,30	cal/cm²
Distancia de trabajo	450	mm
EPP requerido	Categoría 1	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,45	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

Figura 30 (a) Etiqueta con la norma NFPA70E.

Figura 30 (b) Etiqueta con la norma IEEE1584.

Como se observa en la Figura 30 (a) y la Figura 30 (b), la etiqueta permite conocer el nombre del proyecto del caso de estudio, la información general del sistema, los resultados de la energía incidente y el método de cálculo utilizado con sus respectivas restricciones. Dentro de la etiqueta se adiciona las distancias de seguridad limitada y restringida, las cuales son exigidas por el RETIE 2013 en su artículo 13.4 “Distancias de seguridad”, adoptadas de la norma NFPA 70E.

Nota 1: Para el correcto funcionamiento del programa SARE, se debe tener en cuenta las restricciones que tiene cada norma al momento de calcular la energía incidente. El programa advierte a los usuarios cuando los límites de cada método son sobrepasados, Ejemplo: como se puede observar en la Figura 30(a) las restricciones fueron sobrepasadas ya que una de las ecuaciones de la norma NFPA 70E solo permite determinar la energía incidente para tensiones menores a 600 V, a partir de tensiones mayores a 600 V la norma NFPA 70E utiliza el método teórico de Ralph Lee. Para el caso de la norma IEEE 1584 Figura 30 (b), no se observa ningún tipo de advertencia, ya que en ningún momento se está sobrepasando las restricciones de la norma.

Nota 2: Con el fin de alertar a las personas sobre las consecuencias de no llevar el EPP, la etiqueta del programa SARE tendrá un color diferente dependiendo de la categoría del EPP. En la Figura 31 (a) se puede observar la etiqueta para una categoría 1,

en la Figura 31 (b) la etiqueta para la categoría 2, en la Figura 31 (c) la categoría para la etiqueta 3 y en la Figura 31 (d) para la categoría 4.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	43,74	kA
Energía incidente	0,08	cal/cm ²
Distancia de trabajo	455	mm
EPP requerido	Categoría 1	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,455	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

Figura 31 (a) Etiqueta – Categoría 1.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	43,74	kA
Energía incidente	4,16	cal/cm ²
Distancia de trabajo	455	mm
EPP requerido	Categoría 2	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,455	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

Figura 31 (b) Etiqueta – Categoría 2.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	43,74	kA
Energía incidente	9,36	cal/cm ²
Distancia de trabajo	455	mm
EPP requerido	Categoría 3	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,455	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

Figura 31 (c) Etiqueta – Categoría 3.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 1	
Tensión	13200	V
Corriente de cortocircuito	43,74	kA
Energía incidente	31,19	cal/cm ²
Distancia de trabajo	455	mm
EPP requerido	Categoría 4	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1,5	m
Distancia Restringida	0,7	m
Distancia técnica	0,455	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

Figura 31 (d) Etiqueta - Categoría 4.

Para finalizar la presentación del programa SARE, en la Figura 32 se puede visualizar la interfaz completa del programa.

Simulación del Arco Eléctrico - SARE

Datos generales del sistema		Datos del arco eléctrico	
Puente de potencia	20 MVA	NORMA A UTILIZAR: NFPA 70E <input type="checkbox"/> IEEE 1584 <input type="checkbox"/>	
Tensión primario	13,2 kV	Tipo de arco	Arco caja
Tensión secundario	7000 V	Distancia electrodos	Interruptores 5 kV
Potencia trafo	1000 kVA	Sistema de puesta a tierra	Con SPT
Carga Estática	1000 kW	Tiempo despeje falla	0,185 s
Impedancias normalizadas		Distancia de trabajo	450 mm
Z%	4,6	Tipo de corriente	Simetrica
Z _t	2254,00 Ω		
R _t	210,700 Ω		
X _t	2244,13 Ω		
R _t			
X _t	0,09		

Tramo 1	
L1	10 m
Conductor	500 AWG
Tipo conductor	Unipolar
Impedancias del conductor	
Z _t	1,49 mΩ
R _t	0,89 mΩ
X _t	1,20 mΩ

Tramo 2	
L2	20 m
Conductor	4 AWG
Tipo conductor	Unipolar
Impedancias del conductor	
Z _t	21,42 mΩ
R _t	21,29 mΩ
X _t	2,40 mΩ

BARRA A ANALIZAR

Barra 1 Barra 2 Carga

RESULTADOS

CATEGORÍA DE EPP EPP NO DEFINIDO

ADVERTENCIA

PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA

Nombre del proyecto	Ejemplo
Barra de análisis	
Tensión	V
Corriente de cortocircuito	kA
Energía incidente	cal/cm ²
Distancia de trabajo	450 mm
EPP requerido	EPP NO DEFINIDO

Distancia Limitada parte móvil expuesta	FALSO	m
Distancia Limitada parte fija expuesta	FALSO	m
Distancia Restringida	FALSO	m
Distancia técnica	0,45	m

Método de cálculo:

Figura 32 Interfaz completa del programa SARE.

Después de conocer el funcionamiento y presentación del programa SARE, a continuación se realiza la comparación del programa SARE con el programa ETAP.

6.2 Comparación del programa ETAP con el programa SARE

Se implementó el sistema radial simple del programa SARE en el programa ETAP y para realizar la comparación de ambos programas implemento los siguientes escenarios de simulación: corriente de cortocircuito, corriente de arco, energía incidente y etiqueta de resultados. En la Figura 33, se presenta el diagrama unifilar implementado.

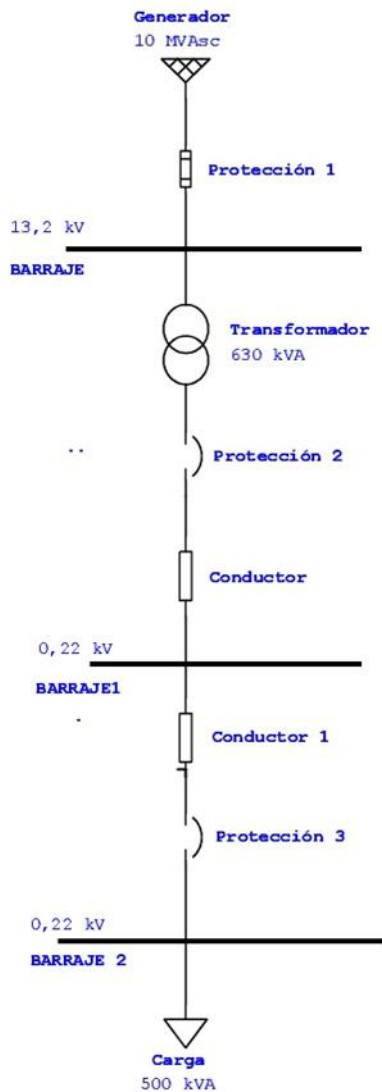


Figura 33 (a) Circuito radial simple implementado en el programa ETAP

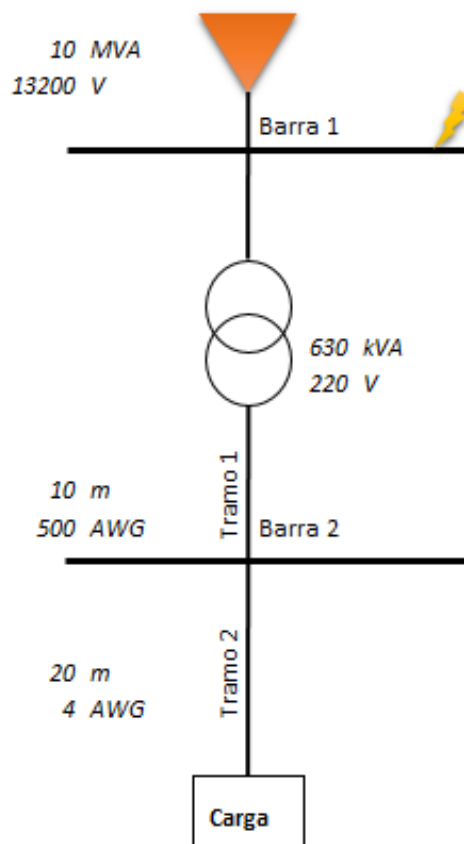


Figura 33 (b) Circuito radial simple implementado en el programa SARE

Para realizar el análisis comparativo del funcionamiento entre los programas SARE y ETAP, en la Tabla 13, se puede observar las características iniciales del caso de estudio y los parámetros que se varían en cada uno escenarios presentes.

Tabla 13 Escenarios de simulación para la comparación del programa ETAP y el programa SARE.

<p>Características iniciales del caso de estudio:</p> <p>Potencias de los transformadores: 225 kVA a 10.000 kVA</p> <p>Tensión del transformador: 13,2 kV/0,220 kV</p> <p>Distancia de trabajo: 455 mm</p> <p>Distancia entre electrodos: 13 mm</p> <p>Tiempo aproximado de despeje falla: 0,04 s</p> <p>Tipo de arco: En caja</p> <p>Cuenta con SPT: Sí</p>	
<p>Escenario 1, Corriente de cortocircuito</p>	<p>Escenario 2, Corriente de arco</p>
<p>Escenario 3, Energía incidente</p>	<p>Escenario 4, Etiqueta de cada programa.</p>

Resultados primer escenario

El primer escenario consiste en calcular la corriente de cortocircuito del caso de estudio con el programa ETAP y el programa SARE, los dos programas utilizan la norma IEC 60909-1 [18] para determinar la corriente de cortocircuito, teniendo en cuenta la longitud de los conductores, la potencia del transformador, la impedancia de las líneas y del transformador, entre otros. A continuación en la Figura 34 (a) se puede observar el comportamiento de la corriente de cortocircuito calculada con el programa SARE y en la Figura 34 (b) se observa la corriente de cortocircuito con el programa ETAP.

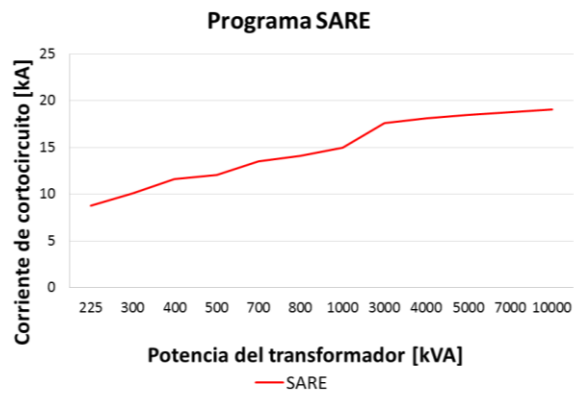


Figura 34 (a) Corriente de cortocircuito calculada con el programa SARE.

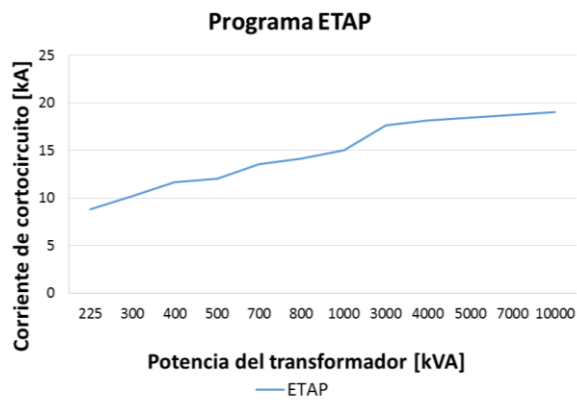


Figura 34 (b) Corriente de cortocircuito calculada con el programa SARE.

Al comparar la corriente de cortocircuito obtenida con el programa SARE y el programa ETAP, se puede observar que ambos programas tienen el mismo comportamiento, teniendo una diferencia en el cálculo del 0,14%.

Resultados segundo escenario

El segundo escenario consiste en calcular la corriente de arco con el programa ETAP y el programa SARE, la cual solo puede ser calculada con la norma IEEE 1584, debido que la norma NFPA 70E calcula la energía incidente sin necesidad de calcular la corriente de arco. El valor de la corriente de arco depende del valor de la corriente de cortocircuito y de la distancia entre los electrodos. A continuación en la Figura 35 (a) se puede observar el comportamiento de la corriente de arco calculada con el programa SARE y en la Figura 35 (b) se observa la corriente de arco con el programa ETAP.

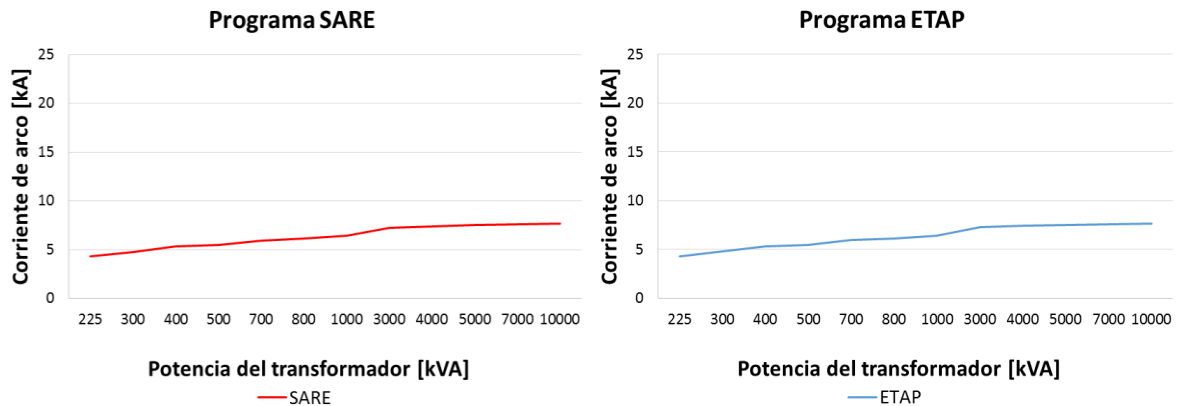


Figura 35 (a) Corriente de arco calculada con el programa SARE.

Figura 35 (b) Corriente de arco calculada con el programa ETAP.

Al comparar la corriente de arco obtenida con el programa SARE y el programa ETAP, se puede observar que ambos programas tienen el mismo comportamiento, teniendo una diferencia en el cálculo del 0,27%.

Resultados tercer escenario

El tercer escenario consiste en calcular la energía incidente con el programa ETAP y el programa SARE, la cual solo puede ser calculada con la norma IEEE 1584, debido que el programa ETAP no tiene la opción de calcular la energía incidente con la norma NFPA 70E. El valor de la energía incidente depende del valor de la corriente de cortocircuito, de la distancia de trabajo, del tiempo de despeje de la falla, del sistema de puesta a tierra y de la distancia entre los electrodos. A continuación en la Figura 36 (a) se puede observar el comportamiento de la energía incidente calculada con el programa SARE y en la Figura 36 (b) se observa energía incidente calculada con el programa ETAP.

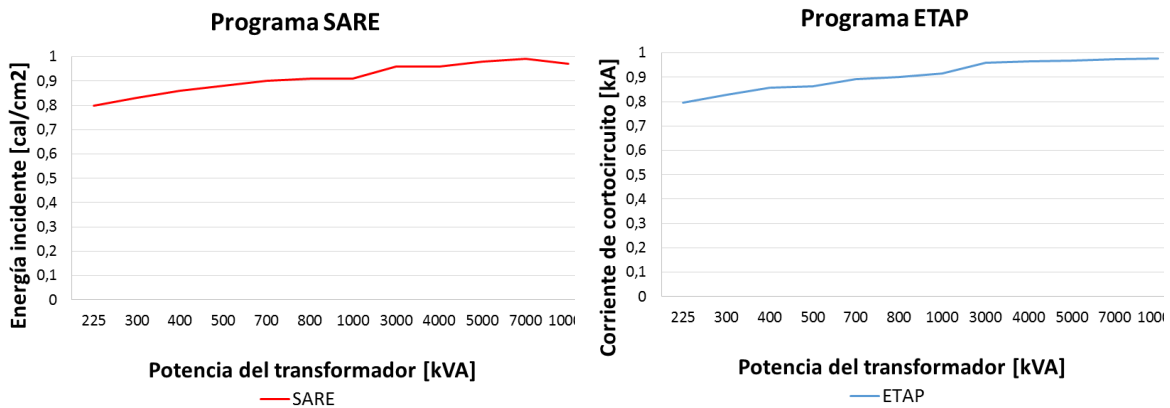


Figura 36 (a) Energía incidente calculada con el programa SARE.

Figura 36 (b) Energía incidente calculada con el programa ETAP.

Al comparar la energía incidente obtenida con el programa SARE y el programa ETAP, se puede observar que ambos programas tienen el mismo comportamiento, teniendo una diferencia en el cálculo del 0,54%.

Resultados cuarto escenario

El cuarto escenario consiste en comparar la etiqueta del programa ETAP y la del programa SARE. Las etiquetas permiten visualizar la energía incidente y el EPP que se debe utilizar al momento de trabajar cerca o en el lugar del equipo. A continuación en la Figura 37 (a) se puede observar la etiqueta del programa SARE y en la Figura 37 (b) se puede observar la etiqueta del programa ETAP.

ADVERTENCIA		
PELIGRO DE ARCO ELÉCTRICO Y DE DESCARGA		
Nombre del proyecto	Ejemplo	
Barra de análisis	Barra 2	
Tensión	220	V
Corriente de cortocircuito	13,02	kA
Energía incidente	0,81	cal/cm²
Distancia de trabajo	450	mm
EPP requerido	Categoría 1	
Distancia Límitada parte móvil expuesta	3	m
Distancia Límitada parte fija expuesta	1	m
Distancia Restringida	EVITAR CONTACTO	
Distancia técnica	0,45	m
Método de cálculo:	Norma IEEE1584	

CATEGORÍA DE EPP	Categoría 1
	Casco con pantalla de protección o gafas protectoras Protección auditiva
	Camisa de algodón y chaqueta de manga larga
	Guantes de latex Clase 0 Guantes de cuero
	Pantalón de algodón
	Botas de seguridad Dieléctricas

Figura 37 (a) Etiqueta del programa SARE.



	 ADVERTENCIA	
Peligro de Destello y de Descarga con Cubiertas o Puertas Abiertas PPE Requerido Adecuado		
Protección contra Destello Level 0 Energía Incidente (cal/cm²) 0.8 Distancia de Trabajo 18.0 in Limite de Protec. Contra Destello 1.2 ft PPE Requirements have not been approved	Protección contra Conmoción 220 VAC Peligro de Conmoción cuando covers removed Acercamiento Limitado 3.5 ft Acercamiento Restringido 1.0 ft Clase de PPE de Guantes 00 V-Rating 500 VAC	
Equipo: BARRAJE1 Nombre Equipo:		Dispositivo de Protección de Fuente: Protección 2
Contrato #	Ingeniero	Fecha 06-03-2018
Cambios en ajustes de equipo o configuración de sistema puede invalidar los valores calculados y los requerimientos de EPP los cuales pueden resultar en condición de peligro.		

Figura 37 (b) Etiqueta del programa ETAP.

Se puede observar que ambas etiquetas tienen la misma información básica, dejando evidencia de la energía incidente, la distancia de trabajo y del EPP. El programa SARE

permite conocer el EPP de manera visual siendo más fácil para la persona conocer el equipo de debe usar.

Durante los escenarios de simulación se observó que los cálculos del programa SARE son similares a los cálculos del programa ETAP, teniendo una diferencia entre ambos programas menor al 1%, de esta manera se puede concluir, que el programa SARE funciona adecuadamente y con un margen de error mínimo siendo una herramienta muy útil y fácil de manejar. Se debe complementar el programa SARE, cambiando la interfaz del programa permitiendo calcular la energía incidente de cualquier tipo de sistema, ya sea radial simple o con diferentes ramales, sistema anillado, entre otras configuraciones.

6.3 Resumen

Se creó en Excel el programa SARE para calcular la energía incidente de forma didáctica y fácil de utilizar, para comprobar su funcionamiento se comparó la energía incidente en cuatro escenarios de simulación del programa SARE y el programa ETAP

Diferencias entre el programa ETAP y SARE

- En los primeros tres escenarios de simulación se compararon la corriente de cortocircuito, corriente de arco y la energía incidente respectivamente, el porcentaje de error entre los programas fue menor al 1%, por tanto, se concluye que el error entre del programa SARE respecto al programa ETAP es aceptable.
- En el cuarto escenario de simulación se comparó la etiqueta donde cada programa presenta los resultados del análisis de la energía incidente, de esta manera se puede observar la interfaz de los programas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En este capítulo se presentan las conclusiones principales de los análisis realizados en la tesis, además se destacan las más importantes contribuciones y se proponen futuros desarrollos.

7. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

A continuación se describen las conclusiones generales, presentadas como el resultado de la presente tesis.

7.1 Conclusiones generales

- Basados en los resultados de las simulaciones uno de los factores que más influye para la disminución del riesgo por arco eléctrico es disminuir la duración del tiempo de despeje de la falla, por tanto, se debe asegurar la realización de un adecuado estudio de coordinación de protecciones garantizando la apertura de la protección en el menor tiempo posible.
- A medida que la energía incidente aumenta, también se aumenta la seguridad del EPP, por tanto, será más dificultoso para el operario realizar maniobras con un EPP de categoría 4 que con uno de categoría 2.
- Para tensiones entre 5 kV a 15 kV, en donde se presenta las mayores diferencias entre las normas. La norma NFPA70E tiene un valor de energía incidente muy alto, exigiendo EPP de categoría 4, mientras que para las mismas condiciones la norma IEEE 1584, varía entre las categorías 0 a 1.

- Para el caso de tensiones superiores a los 15 kV la energía incidente es igual para ambas normas, debido que ambas normas utilizan la ecuación de Ralph Lee para calcular la energía incidente para tensiones superiores a los 15 kV.
- La norma IEEE 1584 requiere más datos para calcular la energía incidente, siendo la distancia entre electrodos el dato más difícil de conseguir, el cual se obtiene de acuerdo a las especificaciones técnicas de los proveedores de los tableros o celdas.
- La norma NFPA 70E tiene como mayor restricción el limitado rango de las corrientes de cortocircuito, debido que muchos de los sistemas tienen corrientes de cortocircuito menores a 16 kA.
- La norma IEEE 1584 no describe el vestuario que debe utilizar la persona de acuerdo al valor de la energía incidente, solo se puede encontrar dentro de la norma las ecuaciones para el cálculo de la energía incidente. Por el contrario la norma NFPA 70E describe detalladamente todo el vestuario que debe utilizar la persona (Tabla 130.7 (C)(16) NFPA 70E) y las ecuaciones para calcular la energía incidente.
- La norma IEEE 1584 y la norma NFPA70E establecen las mismas distancias de trabajo las cuales dependen del nivel de tensión y de las características del equipo a analizar. Sin embargo, la norma NFPA 70E, establece otros límites de seguridad: límite de aproximación restringida, límite de aproximación técnica y límite de aproximación segura, dichos límites dependen del nivel de tensión y el tipo de corriente (continua, alterna).

- En tres escenarios de simulación del caso de estudio de BT, la energía incidente es 2,5 veces mayor al ser calculada con las ecuaciones de la norma NFPA 70E que con las ecuaciones de la norma IEEE 1584. Esto debido que la norma NFPA70E no tiene en cuenta algunas variables que afectan la naturaleza y conformación del arco (distancia entre electrodos, SPT, protecciones).
- En el cuarto escenario del caso de estudio de BT, la energía incidente es mayor entre las tensiones 0,220 kV y 0,400 kV con la norma NFPA70E, entre las tensiones 0,400 kV a 1 kV la energía incidentes es mayor con la norma IEEE1584 y a partir de 1 kV le tensión es mayor con la norma NFPA70E. El único escenario en donde la energía incidente es mayor al ser calculada con la norma IEEE1584 es entre las tensiones 0,400 kV a 1 kV, su explicación se debe que para tensiones menores a 1 kV la norma IEEE1584 tiene en cuenta la tensión dentro de su ecuación, mientras que la norma NFPA70E no tiene en cuenta dicho parámetro. Por tanto, la energía incidente es proporcionalmente a la tensión para tensiones menores a 1 kV.
- En el caso de MT la energía incidentes es 13 veces mayor con la norma NFPA 70E al ser comparada con la norma IEEE1584, esto ocurre que para tensiones mayores a 0,600 kV, ya que la norma NFPA70E utiliza la misma ecuación que utiliza la norma IEEE1584 para tensiones mayores a 15 kV, por tanto, la norma NFPA 70E tiende a ser más rigurosa para sistemas de MT.
- En los primeros tres escenarios de simulación se compararon la corriente de cortocircuito, corriente de arco y la energía incidente respectivamente, el porcentaje de error entre los programas fue menor al 1%, por tanto, se concluye que el error entre del programa SARE respecto al programa ETAP es aceptable.

7.2 Aportes

- Se programó en EXCEL el programa SARE, e cual permite calcular la energía incidente con la norma NFPA 70E y la norma IEEE 1584.
- El programa SARE permite visualizar uno a uno los elementos del EPP que se debe utilizar, esto con el fin de presentar la forma correcta para usar la vestimenta seleccionada.
- El programa SARE permite imprimir la etiqueta donde indica el valor de la energía incidente, distancia de trabajo, distancia de trabajo seguro, categoría del EPP, entre otros.
- La utilización de programa SARE permite dar cumplimiento al Reglamento de Instalaciones Eléctricas RETIE 2013.
- Se ha definido que la energía incidente no siempre es de mayor valor al ser calculada con la norma NFPA 70E, sin embargo, se evidenció que entre tensiones de 5 kV a 15 kV es más recomendable utilizar la norma IEEE 1584 para realizar el cálculo de la energía incidente.

7.3 Futuros desarrollos

Debido que el tema central de esta tesis es muy amplio, se podría continuar con diferentes estudios, nombrando a continuación los trabajos principales:

- Es conveniente realizar un estudio que se enfoque en la disminución de la energía incidente a través de la coordinación de protecciones, debido que es el método más eficaz para disminuir el riesgo por arco eléctrico.
- Migrar el calculador SARE a un programa ejecutable, que permita integrar diferentes tipos de circuitos, incluyendo motores.
- Implementar en todos los equipos eléctricos la etiqueta donde se evidencie como mínimo el valor de la energía incidente y el EPP a utilizar al momento de operar cerca o dentro del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ralph H. Lee, *The other electrical hazard: Electric arc Blast burns*, IEEE Transactions on industry applications, vol. 1A-18, No.3, 1982.
- [2] A. M Stoll and M. A. Chianta, Method and rating systems for evaluation of thermal protection, Bureau Aeros. Med., vol. 40, No. 11, pp 1232-1238, 1969.
- [3] R. Abhari, D. Goldgof, M. Lanzerotti, T. Samad, G. W. Arnold, B-M. Haemmerli, O. P. Malik, G. Zobrist, F. Canabero, D. Jacobson, S. Nahavandi, *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*, John Wiley & Sons, 2012.
- [4] W.A. Brown and R. Shapiro, *Incident energy reduction techniques*, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 15, no. 3 , pp. 53 – 61, 2009.
- [5] NFPA 70E, *Electrical Safety in Workplace*, 2015.
- [6] R. L. Doughty, T. E. Neal, H. L. Floyd, *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, pp. 257-269, 2000.
- [7] IEEE Guide for Arc-Flash Hazard Calculations, IEEE Standard 1584-2002.
- [8] RETIE, *Reglamento de Instalaciones Eléctricas*, 2013.
- [9] Héctor Jonattan Vallejo Bolaños, *Caracterización de los casos de electrocuciones fatales atendidos por el instituto nacional de medicina legal y ciencias forenses en Colombia entre enero y junio de 2007*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina, departamento de patología, especialidad en medicina forense, 2012.
- [10] Alberto Tejada Valbuena, *Caracterización de las electrocuciones en Colombia, 2010-2014*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina, departamento de patología, 2016.
- [11] Reza Tajali, *Arc Flash analysis: IEEE Method versus the NFPA 70E tables*, Schneider electric engineering services, 2012.
- [12] T. Crnko, S. Dynes, Arcing fault hazards and safety suggestions for design and maintenance, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, pp. 23-32, 2001.

- [13] Franciso Javier Ramirez Cano, Fredy Alberto Rivas Patermina, *Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía*, II Congreso internacional: Sostenibilidad y la industria eléctrica – CISLIE, 2011.
- [14] K. T. Compton, *theory of the electric arc*, Phys, Rev. 21, pp. 266, 1923.
- [15] Carlo E. Vallejo, Jose F. Rivera, Jorge W. González, Hugo A. Cardona, Idi A. Isaac, Gabriel J. López, *Desarrollo de aplicativo computacional para estudios del arco eléctrico en sistemas industriales*, Revista Investigaciones Aplicadas, Vol. 7, No. 2, julio 2013.
- [16] S. Jamil, R. A. Jones, L. B. McClung, *Arc and flash burn hazards at various levels of an electrical system*, Industry Applications Society 42nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, pp. 317 – 325, 1995.
- [17] Low voltaje circuit breakers arc flash hazards, ABB.
- [18] Norma internacional IEC 60909-0, *Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna*, 2002.
- [19] L.G. Hewitson, Mark Brown, Ramesh Balakrishnan, *Power system protection*, Electric Power System Resarch, Elsevier, 2004.
- [20] B. de Metz-Noblat, F. Dumas, G. Thomasset, *Cuaderno técnico No. 158*, Schneider electric, 2000.
- [21] International Estándar IEC 62271 – 200, *High-voltage switchgear and controlgear*, 2003.
- [22] A.D. Stokes and D.K. Sweeting , *Electrical arcing burn hazards* , IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, No. 1 , pp. 134 – 142, Jan, Feb. 2006.
- [23] T. Gammon and J. Mathews, *Instantaneous arcing fault models developed for building system analysis*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 3, No. 1, pp. 197 – 203, Jan - Feb. 2001.
- [24] Steven A. Boggs, *Sulphur hexafluoride: Introduction to the material and dielectric*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 5, pp. 18 – 21, 1989.
- [25] Tammy Gammon; Wei-Jen Lee; Zhenyuan Zhang; Ben Johnson, *Arc Flash Hazards, Incident Energy, PPE Ratings, and Thermal Burn Injury—A Deeper Look*, IEEE IAS Electrical Safety Workshop, pp. 1 – 9, 2015.
- [26] R. A. Jones; D. P. Liggett; M. Capelli-Schellpfeffer; T. Macalady; L. F. Saunders; R. E. Downey; L. B. McClung; A. Smith; S. Jamil; V. J. Saporita, *Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment*, Record of Conference Papers. IEEE Industry

Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, pp. 313 – 322, 1997.

[27] Holger Schau, Jens Juhling, Hendrik Beier, Jaroslav Bek, Mike Doherty, *Guía para la selección de equipamiento de protección personal contra los efectos térmicos de un arco eléctrico*, 2011.

[28] T. E. Neal, A.H. Bingham, R.L. Doughty, *Protective clothing guidelines for electric arc exposure*, IEEE Petroleum and Chemical Industry, pp. 281-298, 1996.

[29] C. Inshaw, R. A. Wilson, *Arc flash hazard analysis and mitigation, 58 th Annual conference for protective relay engineers*, pp. 145 – 147, 2005.

[30] Christopher Lee Brooks, *Integrating Arc Flash Analysis with Protective Device Coordination*, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 20, issue. 3, pp. 14-23, 2014.