

ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA SUBESTACIÓN DONATO (TUNJA) PARA LA
EMPRESA DE ENERGÍA DE BOYACÁ EBSA S.A. E.S.P.

ELKIN JAVIER RODRIGUEZ SUESCA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TÉCNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA
DUITAMA, BOYACÁ
2018

ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA SUBESTACIÓN DONATO (TUNJA) PARA LA
EMPRESA DE ENERGÍA DE BOYACÁ EBSA S.A. E.S.P.

ELKIN JAVIER RODRIGUEZ SUESCA

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electromecánico

Director Ing. Juan Carlos Castro Galeano

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TÉCNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA
DUITAMA, BOYACÁ
2018

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Duitama, 08 de Marzo de 2018

A mi madre María Cristina por siempre dar todo de ella y encender en mí el impulso para perseguir los sueños; a mi padre Rubén Darío por su ejemplo, carácter y fortaleza; gracias por nunca darse por vencido y siempre creer y apoyar los proyectos que he emprendido, los dos han dejado en mí un sin número de enseñanzas, los amo mucho.

Elkin Javier Rodríguez Suesca

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por permitirme culminar una etapa más de mi vida; a mi familia que me ha brindado el amor y los medios para llegar hasta este punto y siempre han sido un soporte incondicional para culminar este proyecto; a ti Aleja por regalarme tantos momentos de felicidad, por enseñarme lo que significa la palabra amor y por ser un ejemplo de fortaleza y perseverancia.

Al ingeniero Juan Carlos Castro Galeano por creer en mí, a la UPTC por ser mi casa por los últimos años, a los maestros por su labor, a mis compañeros y amigos los cuales fueron parte fundamental para culminar esta etapa.

Al Ing. Hernan Agudelo por sus consejos y enseñanzas que espero poner en práctica a lo largo de mi carrera profesional como personal, más que un maestro se ha convertido en un amigo; al Ing. Carlos Julio Moreno por la confianza depositada en mí y a la familia de la dirección de Mantenimiento que me recibieron con los brazos abiertos y especialmente a la Empresa de Energía de Boyacá por ser escuela de formación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. CONCEPTOS PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO	18
1.1 FENÓMENO DE ARCO ELÉCTRICO	18
1.1.1 Definición de arco eléctrico.	18
1.1.2 Causas del arco eléctrico.	18
1.1.3 Peligros asociados al arco eléctrico.	19
1.1.4 Consecuencias de un accidente por Arco Eléctrico.	19
1.2 REGLAMENTACIÓN COLOMBIANA Y NORMATIVIDAD RESPECTO AL RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO	20
1.2.1 RETIE.	20
1.2.2 NFPA 70E 2015.	21
1.3 ENERGÍA INCIDENTE	22
1.3.1 Definición.	22
1.3.2 Frontera por arco eléctrico.	23
1.3.3 Métodos de cálculo de energía incidente.	23
1.4 LÍMITES DE APROXIMACIÓN	32
1.5 EVALUACIÓN DEL RIESGO ELÉCTRICO DE ACUERDO A LA NORMA NFPA 70E	34
1.5.1 Evaluación del riesgo de electrocución.	34
1.5.2 Evaluación del riesgo de arco eléctrico.	36
1.5.3 Estado del arte evaluación del riesgo de arco eléctrico	38
2. METODOLOGÍA APLICADA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO	41
2.1 IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO	43
2.2 RECOLECTAR LOS DATOS E INFORMACIÓN DEL SISTEMA E INSTALACIONES	43

2.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	45
2.4 CORTOCIRCUITO	47
2.4.1 Descripción del Método ANSI/IEEE.	48
2.5 DETERMINACIÓN DE LA ENERGIA INCIDENTE	49
2.6 DETERMINACIÓN DE FRONTERAS DE APROXIMACIÓN LIMITADA Y RESTRINGIDA	50
2.6 ESPECIFICACIÓN DE LA VESTIMENTA PROTECTORA	50
2.7 ELABORACIÓN DE ETIQUETAS	52
3. ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN DONATO	54
3.1 AREA DE INFLUENCIA	55
3.2 PARÁMETROS TÉCNICOS DE LOS EQUIPOS	57
3.2.1 Parámetros de Generadores.	57
3.2.2 Parámetros de Transformadores.	57
3.2.3 Parámetros de Líneas.	57
3.3 MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA	58
3.4 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	58
3.5 COMPROBACIÓN DEL MODELO	59
4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE EN LAS BARRAS DE LA SUBESTACIÓN DONATO	62
4.1 EJEMPLO DESARROLLO BARRA 34.5 kV TR4	62
4.2 EJEMPLO DE CALCULO BARRA 13.8 kV TR2	66
4.3 RESULTADO ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SUBESTACIÓN DONATO	69
4.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE ELECTROCUCIÓN	71
4.5 SELECCIÓN DE LOS EPP RESISTENTES AL ARCO	72
4.5.1 Trenes de celdas barras 13.8 kV.	72
4.5.2 Tren de celdas 34.5 kV y Campo 115 kV.	72
4.5.3 Celda de seccionamiento y de transformador de auxiliares.	73
4.5.4 Tablero auxiliares AC.	74
4.5.5 Tablero auxiliares CC, cargadores y transferencia.	75

4.6 ETIQUETADO DE LA SUBESTACIÓN	76
5. MITIGACIÓN DEL RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO	78
5.1 DISMINUIR LA DURACIÓN DEL ARCO	78
5.1.1 Modificar ajustes de sobrecorriente.	78
5.1.2 Sistema de detección de arco eléctrico.	79
5.1.3 Relés con función de detección de arco eléctrico.	80
5.2 AUMENTAR DISTANCIA DE TRABAJO	80
5.3 VENTANAS INFRARROJAS	81
5.4 CELDAS RESISTENTES AL ARCO ELÉCTRICO	82
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFIA	87

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Probabilidad de sobrevivir a una quemadura.	20
Figura 2. Frontera por arco eléctrico.	23
Figura 3. Límites de proximidad.	33
Figura 4. Vestimenta resistente al arco y EPP de acuerdo a la categorización del riesgo.	37
Figura 5. Metodología aplicada para la evaluación del riesgo de arco eléctrico.	42
Figura 6. Distancia de trabajo.	44
Figura 7. Valores típicos de la IEEE 1584 en ETAP.	46
Figura 8. Descripción de los EPP en ETAP.	46
Figura 9. Barra de herramientas cortocircuito ETAP.	49
Figura 10. Analizador reportes de arco eléctrico.	50
Figura 11. Vestimenta resistente al arco.	51
Figura 12. Etiqueta diseñada según estándar ANSI Z535.	52
Figura 13. Geoposición de la subestación Donato.	54
Figura 14. Diagrama unifilar sencillo subestación Donato.	55
Figura 15. Área de influencia estudio de cortocircuito.	56
Figura 16. Perturbografía falla trifásica en barra 34.5 kV Donato fase A.	60
Figura 17. Event Record Relé de sobrecorriente barra 34.5 kV Donato.	60
Figura 18. Tren de celdas 34.5 kV.	62
Figura 19. Esquema dispositivos de protección falla de arco en barra 34.5 kV.	62
Figura 20. Curva de sobrecorriente ajustada en el relé de entrada a la barra 34.5 kV.	64
Figura 21. Efectos de falla de arco en la barra 34.5 kV de la subestación Donato.	65
Figura 22. Tren de celdas 13.8 kV de la subestación Donato.	66
Figura 23. Esquema Dispositivos de protección falla de arco en barra 13.8 kV.	67
Figura 24. Curva de sobrecorriente en el relé de entrada de la barra 13.8 kV del TR2.	69

Figura 25. Vestimenta resistente al arco determinados para las barras 13.8 kV.	72
Figura 26. Celda de seccionamiento transformador de auxiliares.	73
Figura 27. Curva de fusible celda de seccionamiento.	73
Figura 28. Vestimenta resistente al arco y EPP determinados para trabajo en los servicios auxiliares de la subestación Donato.	75
Figura 29. Comparación falla trifásica franca y falla de arco en curva de sobrecorriente.	78
Figura 30. Esquema de aplicación sistema detección de arco eléctrico.	79
Figura 31. Comparación de consecuencias en equipos ante una falla de arco eléctrico despejada en diferentes tiempos.	79
Figura 32. Relés que incorporan la detección de arco eléctrico.	80
Figura 33. Mando operado remotamente para maniobra de interruptores.	81
Figura 34. Equipo extraer remotamente interruptores.	81
Figura 35. Termografía a través de ventanas infrarrojas.	82
Figura 36. Funcionamiento celda resistente al arco eléctrico.	82

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efectos y ejemplos para valores de energía incidente	22
Tabla 2 Métodos de cálculo energía incidente y frontera por arco eléctrico	24
Tabla 3. Distancias de trabajo típicas.	25
Tabla 4. Factores para equipos y clases de tensión	28
Tabla 5. Tipos de instalación	29
Tabla 6. Distancias de trabajo típicas	30
Tabla 7. Clases de guantes dieléctricos estándar ASTM D120.	34
Tabla 8. Fronteras de aproximación para protección contra choque eléctrico en sistemas de corriente alterna.	35
Tabla 9. Fronteras de aproximación para protección contra choque eléctrico en sistemas de corriente continua.	35
Tabla 10. Información necesaria de los dispositivos de protección de sobrecorriente	44
Tabla 11. Corrientes de cortocircuito en las principales barras del área de influencia	59
Tabla 12. Comparación corrientes de falla trifásica barra 34.5 kV subestación Donato.	60
Tabla 13. Ajustes actuales de fase sobrecorriente por 34.5 y 115 kV del TR 4	63
Tabla 14. Tiempos típicos de operación de dispositivos de interrupción.	63
Tabla 15. Ajustes actuales de fase sobrecorriente por 13.8 y 115 kV del TR 2	68
Tabla 16. Resultados determinación de la energía incidente usando ETAP.	70
Tabla 17. Evaluación del riesgo de electrocución en equipos de la subestación Donato.	71
Tabla 18. Especificación de la vestimenta protectora resistente al arco y EPP para trabajo en los trenes de celdas de las barras 13.8 kV.	72
Tabla 19. Categorización de los EPP de arco en base a las características del sistema AC.	74
Tabla 20. Especificación vestimenta resistente al arco y EPP Categoría 1.	75
Tabla 21. Categorización de los EPP de arco en base a las características del sistema CC.	76

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A. Anexo informativo H de la NFPA 70E 2015 Guía para la selección de vestimenta protectora resistente al arco y otros equipos de protección personal.
- Anexo B. Identificación del riesgo en base a las tareas que se realizan en el equipo y la categoría de los elementos de protección resistentes al arco para sistemas de corriente alterna y continúa.
- Anexo C. Información requerida típicamente de los equipos para realizar estudio de arco eléctrico.
- Anexo D. Normas aplicables a los elementos de protección personal.
- Anexo E. Registro fotográfico Subestación Donato.
- Anexo F. Diagrama unifilar detallado.
- Anexo G. Área de influencia.
- Anexo H. Características técnicas generadores Área de influencia
- Anexo I. Características técnicas Transformadores Área de influencia
- Anexo J. Siluetas torres de líneas de transmisión más comunes en EBSA
- Anexo K. Características técnicas Líneas de transmisión Área de influencia
- Anexo L. Características técnicas protecciones Área de influencia
- Anexo M. Etiquetas mitigación de riesgo de arco eléctrico.
- Anexo N. Curvas de los dispositivos de protección.
- Anexo Ñ. Reporte arco eléctrico ETAP.

RESUMEN

Cuando una persona trabaja cerca de equipo eléctrico energizado se ve expuesto a riesgos que han existido desde el mismo origen de la electricidad, uno de ellos es el arco eléctrico, que puede lesionar a una persona sin que haya hecho contacto con la parte energizada debido a la liberación de grandes cantidades de energía térmica. Este estudio permite determinar la energía incidente a la que está expuesta una persona mientras trabaja en o cerca de partes energizadas en caso de presentarse una falla por arco, el valor de energía incidente se relaciona con la severidad de las quemaduras que puede recibir un trabajador, por lo que puede tomarse como un indicador del riesgo al que se encuentra expuesto y con este criterio determinar acciones de mitigación. El texto introduce los conceptos involucrados en el estudio de arco eléctrico y establece una metodología siguiendo los lineamientos de las normas NFPA 70E-2015 e IEEE 1584 utilizando como herramienta principal el software ETAP, posteriormente la metodología es aplicada al equipo eléctrico de la subestación Donato perteneciente al sistema de transmisión regional de la empresa de energía de Boyacá y como resultado se obtiene que en las barras 115 kV y 34.5 kV son los puntos de mayor riesgo y se prohíbe el trabajo mientras el equipo se encuentra energizado, mientras que en el tren de celdas de 13.8 kV y los equipos de servicios auxiliares se especifican los elementos de protección personal adecuados, que deben ser considerados como la última barrera de protección, por lo que para mitigar el riesgo desde el punto de vista técnico se sugiere la implementación de sistemas de detección de fallas por arco eléctrico.

INTRODUCCIÓN

El fluido eléctrico ha sido herramienta clave para el desarrollo del hombre, debido a que es la manera más eficiente conocida de transformar y transportar energía, lo que le permite entrar en todos los campos de la actividad humana. “En la actualidad, la mayor dependencia que tenemos de la energía eléctrica ha creado una menor tolerancia para cualquier corte de energía, no importa cuán breve, esto ha producido una necesidad percibida en los trabajadores del sector eléctrico, para realizar el trabajo de mantenimiento en el equipo eléctrico energizado”¹, por lo que el personal operativo del sector eléctrico está cada vez más expuesto a riesgos que han existido desde el mismo origen de la electricidad, el más evidente y del cual la mayoría de personas se percata es el contacto eléctrico, pero existe un riesgo menos visible que puede producir graves lesiones sin ocurrir en contacto con la **parte energizada**, “este riesgo es el denominado arco eléctrico, y es la tercera causa de muerte en la industria, representa uno de los accidentes más comunes y peligrosos en el sector. **A pesar de esto, “solo recientemente se ha tratado como un peligro específico en los programas de seguridad eléctrica y códigos de seguridad”², “ya que el tratamiento de los accidentes eléctricos en materia laboral ha sido tradicionalmente ligado al contacto eléctrico”³.**

Favio Parra⁴, ingeniero experto en riesgo eléctrico, afirma que la causa de la mitad de los accidentes en el sector eléctrico, no solo en Colombia sino en todo el mundo, tiene nombre propio: el arco eléctrico, para tener un panorama más preciso, “entre enero del 2010 y diciembre de 2015 se reportaron 899 muertes por electrocución en Colombia, de estas, el 52.4% se encontraba trabajando en el momento de la muerte.

El termino de arco eléctrico se originó en los años 80 cuando se empezaron a “analizar las personas que sufrieron una lesión de origen eléctrico, donde aparte de “los típicos efectos del paso de la corriente en el organismos (paro cardíaco, fibrilación ventricular, quemaduras internas, entre otros), se originaban muchos eventos de quemaduras externas (principalmente en la piel)”⁵; fue el ingeniero estadounidense Ralph Lee en su artículo “The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns”, relacionado con accidentes eléctricos y

¹ ST. PIERRE, Conrad, *et al.* Introduction. En: Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards. 2 ed. Tualatin: Ted Balderree, *et al.* 2015. p. 1-2.

² *Ibid.*, p. 2.

³ MUÑOZ, Cesar. Estudio de accidentes eléctricos y peligro del arco eléctrico. Introducción a la norma NFPA 70E. Asociación Chilena de seguridad [online], disponible desde internet: <http://www.achs.cl/portal/centro-de-noticias/Documents/Estudio_de_accidentes_eléctricos_y_peligro_del_arco_eléctrico.pdf>.

⁴ Agencia de Noticias Universidad Nacional. Seguridad en Colombia: mucha reglamentación y poca operatividad [online] Prevencionar.com, abril 2015 [Citado 07 Septiembre 2016]. disponible en: <<http://prevencionar.com.co/2015/04/14/seguridad-industrial-en-colombia-mucha-reglamentacion-y-poca-operatividad/>>.

⁵ *Ibid.*, p. 2.

lesiones de quemaduras, quien definió un nuevo enfoque en materia de riesgos eléctricos e introdujo el concepto de arco eléctrico⁶.

Respecto a reglamentación, en Colombiana, el ministerio de minas y energía pone a disposición el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas⁷, de uso obligatorio, que tiene como objeto fundamental establecer medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas; enuncia entre los riesgos más comunes al arco eléctrico y establece los requerimientos que se deben cumplir para mitigarlo, mencionando que se deben seguir con los procedimientos de la norma internacional NFPA 70E (Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo, **“considerada como la más importante en seguridad eléctrica”**⁸) cuando se realicen actividades como “cambio de interruptores o partes de él, intervención sobre transformadores de corriente, mantenimiento de barrajes, instalación y retiro de medidores, apertura de condensadores, macromediciones, medición de tensión y corriente, entre otras”⁹.

Este proyecto es desarrollado para La empresa de Energía de Boyacá S.A. ESP¹⁰, empresa prestadora de servicios públicos de nacionalidad Colombiana, encargada de la operación de la red del STR y SDL en el departamento de Boyacá, como lo especifica la comisión de regulación de energía y gas CREG¹¹ entre sus funciones esta la planeación, expansión, inversiones, la operación y el mantenimiento de todo o parte del sistema de transmisión regional y sistema de distribución local, incluidas sus conexiones al sistema de transmisión nacional.

Este trabajo tiene como objeto evaluar el riesgo de arco eléctrico como plan piloto en la subestación Donato perteneciente al STR a cargo de la Empresa de Energía de Boyacá de acuerdo a la evaluación de riesgo eléctrico especificada en la NFPA 70E y de esta manera poderlo mitigar con la selección correcta de los elementos de protección personal,

⁶ LEE, Ralph H. **“The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns”** IEEE Transactions on Industry Applications. Institute of Electrical and Electronic Engineer, Mayo 1982, Vol. IA-18 No. 3. p 247.

⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 90708. (30, agosto, 2013). Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, que fija las condiciones técnicas que garanticen la seguridad en los procesos de Generación, Transmisión, Transformación, Distribución y Utilización de la energía eléctrica en la república de Colombia y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2013. no. 48904. p. 1-211.

⁸ GRANADOS, Germán. NFPA 70 E, seguridad eléctrica en lugares de trabajo. SafetyWork [online]. 2016, [citado 2017-09-08], disponible desde internet: < <http://www.safetyworkla.com/new/NFPA-70-E-seguridad-electrica>>.

⁹ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Resolución 90708, Op. cit. p 61.

¹⁰ EMPRESA DE ENERGÍA DE BOYACA. [En línea]. Tunja (Boyacá): La entidad, 2016. [Citado el 26 de noviembre de 2016]. Disponible desde internet:< <http://www.ebsa.com.co> >.

¹¹ COLOMBIA. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 097. (26, septiembre, 2008). Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional y Distribución Local. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2010. no. 47721. p. 11.

procedimiento seguros de trabajo, señalización del riesgo por medio de etiquetas en donde el riesgo exista que advierta a los trabajadores, y así dar cumplimiento al RETIE y a la resolución 1348¹² la cual establece que los riesgos que puedan generar para las personas, deben ser conocidos por quienes intervienen y se deben adoptar procedimientos y equipos de trabajo a estas condiciones específicas.

El nivel de riesgo es determinado a partir del cálculo de la energía incidente, que depende principalmente de dos valores, uno de ellos es la corriente de cortocircuito y el otro es el tiempo de despeje de falla; para hallarlos, debido a la complejidad del sistema eléctrico de la EBSA E.S.P. se usa el software ETAP Powering Succes versión 12.6, herramienta clave para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

La evaluación del riesgo de arco eléctrico es un tema relativamente nuevo en Colombia que es de interés para muchos sectores de la industria del país, ya que en materia de seguridad la reglamentación cada día es más exigente y es prioridad para las empresas proteger la vida de las personas. Este trabajo sobresale debido a que el análisis es aplicado a una empresa que distribuye y comercializa energía eléctrica, el cual requiere un análisis del sistema eléctrico de potencia más complejo en comparación de la mayoría de trabajos consultados que son aplicados a plantas industriales en baja tensión.

Este trabajo se limita a la determinación de la energía incidente y a la selección de la vestimenta resistente adecuada, y sugiere desde el punto de vista técnico como mitigar el riesgo, pero no entra a fondo de que políticas de seguridad se deben implementar en la organización, ya que este trabajo es considera como un plan piloto y se consideran los aspectos solo desde el punto de vista técnico.

En el capítulo 1 se introducen los conceptos necesarios para realizar la evaluación del riesgo de arco eléctrico, la normatividad nacional e internacional y que resultados se deben obtener de la evaluación de riesgo. En el capítulo 2 se presenta la metodología aplicada en para la evaluación de riesgo en la subestación Donato desglosada en cada etapa. En el capítulo 3 se describe el sistema eléctrico de la subestación Donato y se delimita la zona de influencia para la determinación de las corrientes de cortocircuito. En el capítulo 4 se realiza el cálculo de energía incidente para seleccionar los elementos de protección personal correspondientes al nivel de energía incidente y se finaliza con el etiquetado a los equipos de la subestación. En el capítulo 5 se explica el principio de funcionamiento de algunos métodos de mitigación del riesgo de arco eléctrico desde el punto de vista técnico.

¹²COLOMBIA. MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 1348. (30, abril, 2009). Por la cual se adopta el Reglamento de Salud Ocupacional en los Procesos de Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica en las empresas del sector eléctrico. Diario Oficial. Bogotá, D.C. ,2009. no. 47342. p. 12.

CAPITULO 1

CONCEPTOS PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

ALBERT EINSTEIN

En este capítulo se explica el fenómeno de arco eléctrico, causas y peligros asociados, se aborda el tema en lo que concierne a reglamentación colombiana, estándares nacionales e internacionales, posteriormente se introducen los conceptos utilizados en la evaluación del riesgo de arco eléctrico y electrocución, finalmente el capítulo concluye con los requerimientos de la NFPA 70E para realizar la evaluación del riesgo de origen eléctrico.

1. CONCEPTOS PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO

1.1 FENÓMENO DE ARCO ELÉCTRICO

1.1.1 Definición de arco eléctrico. **“Se denomina arco** eléctrico al proceso sostenido de circulación de corriente eléctrica elevada a través de un material normalmente aislante, puede ser el aire cuyos átomos y moléculas elevan su temperatura (hasta 20000 °C) y se ionizan originando plasma, que se comporta como conductor por su alta disponibilidad de carga libre o por el enriquecimiento del ambiente”¹³.

1.1.2 Causas del arco eléctrico. Normalmente se origina en cortocircuitos cuyas causas pueden ser¹⁴:

- Polvo o impurezas: el depósito de material conductor en la superficie aislante proporciona una trayectoria para la corriente y también los vapores de productos químicos pueden ionizar el medio reduciendo las propiedades aislantes del aire y causar el arco.
- Corrosión: La corrosión de las partes del equipo proporcionan impurezas en las superficies y debilita el contacto entre las terminales de los conductores aumentando la resistencia de contacto por lo que genera calentamiento y apertura del circuito.
- Herramientas que caen: los trabajadores pueden dejar caer accidentalmente herramientas que si hacen contacto con partes que están energizadas causarían un cortocircuito momentáneo iniciando el arco.
- Toque accidental: el contacto accidental con partes expuestas vivas pueden iniciar el arco.
- Sobretensiones: debido a una mala maniobra o descargas atmosféricas.
- Procedimiento de trabajo inapropiado: como apertura inadecuada de interruptores o seccionadores.
- Deterioro del material aislante.

¹³ AMÓRTEGUI Gil y MERCADO V. Doris. **“Arco Eléctrico: Investigación y soluciones”**. En Congreso Internacional de Seguridad Eléctrica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Citado por: RAMIREZ, Francisco. RIVAS, Fredy. Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo de arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía. En: Revista CIER. Septiembre, 2011, no. 60, p. 57-69.

¹⁴ST. PIERRE. Op. cit., p. 4.

1.1.3 Peligros asociados al arco eléctrico. En un evento de arco eléctrico hay una serie de peligros implícitos que se enuncian a continuación:

- Calor: El arco eléctrico es ampliamente conocido como una fuente de calor de muy alto nivel, usada comúnmente en procesos de soldadura, hornos para fundir metal e incluso en la cauterización eléctrica de heridas; la única fuente de temperatura más alta conocida en la tierra es la que puede producir el láser¹⁵.
- Presión: debido al súbito aumento de temperatura el aire se expande creando una onda de presión llamada *arc blast*.
- Objetos: Todos los materiales se vaporizan a la temperatura que alcanza un arco eléctrico, por lo que las partículas de metal fundido y objetos sólidos son esparcidos a altas velocidades.
- Sonido: el súbito aumento de presión llega producir sonidos de hasta 140 dB, que puede producir daños en el sistema auditivo¹⁶.
- Productos tóxicos: la desintegración de los materiales y el humo liberado, producto de un arco eléctrico, constituyen en un gran peligro para las personas que se encuentran cerca¹⁷.
- Radiación Ultravioleta: un arco eléctrico produce una luz brillante, rayos ultravioleta e infrarrojos, los cuales producen quemaduras en los ojos y la piel¹⁸.

1.1.4 Consecuencias de un accidente por Arco Eléctrico. Para una persona expuesta a un arco eléctrico son muchas las lesiones que pueden llegar a sufrir debido a la misma naturaleza del arco, pero son las quemaduras la consecuencia más relevante en la mayoría de los casos. Las partes del cuerpo que se ven afectadas más severamente por las quemaduras son rostro y manos, seguido de antebrazo y pecho¹⁹ lo que “representan un costo de vida devastador, pues resultan de las lesiones más dolorosas y debilitantes para quien las sufre; son fuente de desfiguramiento, por lo que ocasionan una profunda depresión en las personas que son atacadas por este tipo de lesiones, lo que resulta en afectaciones en la vida diaria de los lesionados y un impacto profundo en los familiares de la víctima; en otras palabras, todos los involucrados de manera directa o indirecta con un accidente por arco eléctrico se ven afectados”²⁰.

¹⁵ LEE. Op. cit., p. 247.

¹⁶ RAMIREZ, Francisco. RIVAS, Fredy. Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo de arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía. En: Revista CIER. Septiembre, 2011, no. 60, p. 57-69.

¹⁷ Ibid., p. 60.

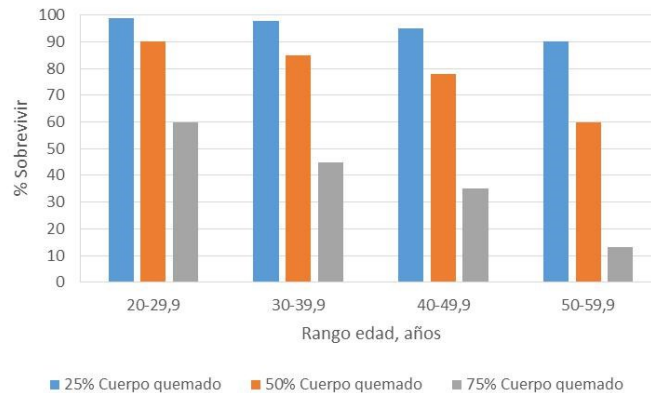
¹⁸ Ibid., p. 60.

¹⁹ SIBILLE SAFE. Trajes y accesorios de protección contra el arco eléctrico. Barcelona, 2013. 13 p.

²⁰ CONSTRUCTOR ELÉCTRICO. Arco eléctrico consecuencias, normas y protección [online] Oct 2014. Disponible desde internet: < <https://constructoreléctrico.com/arco-eléctrico-consecuencias-normas-y-proteccion/>>.

En la Figura 1, se indica que la probabilidad de sobrevivir a una quemadura disminuye con la edad.

Figura 1. Probabilidad de sobrevivir a una quemadura.



Modificado de: Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards.

Desde el punto de vista económico, en caso de presentarse un accidente por arco eléctrico y si la valoración de la ARL determina que el empleador no cumple con el reglamento vigente, este debe asumir millonarias multas, como ejemplo en Colombia El ministerio de trabajo sanciona a la electrificadora de Santander con multas superiores a 138 millones de pesos por incumplimiento en las normas de seguridad y salud en el trabajo, la sanción que queda en firme con la resolución 3450 del 2 de septiembre de 2016 , se dicta debido a que unos de sus empleados sufrió un accidente de trabajo el 10 de febrero de 2007 como consecuencia se quemó el 59% del cuerpo mientras hacía mantenimiento en una de las subestaciones eléctricas en el nivel de 34.5 kV víctima del fenómeno de arco eléctrico. El trabajador duro más de un año hospitalizado en la unidad de quemados e incapacitado por cuatro años y medio²¹

1.2 REGLAMENTACIÓN COLOMBIANA Y NORMATIVIDAD RESPECTO AL RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

1.2.1 RETIE. En lo que concierne al riesgo de arco eléctrico en el artículo 9 es mencionado entre los factores de riesgo más comunes y en el artículo 13.4 *Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas* especifica como mitigarlo, diciendo que se debe

²¹EL FRENTE. Juan Gabriel Henao Mantilla, víctima de un accidente de trabajo, pensionado por invalidez, se quemó el 59% del cuerpo por una descarga eléctrica hace diez años [online]. Oct 2016. Disponible desde internet:<<http://www.elfrente.com.co/web/index.php?ecsmodule=frmstasection&ida=58&idb=107&idc=7288>>.

cumplir con los procedimientos seguros establecidos en la NFPA 70E cuando se realicen actividades como: “cambio de interruptores o partes de él, intervenciones sobre transformadores de corriente, mantenimiento de barrajes, instalación y retiro de medidores, apertura de condensadores, macromediciones, medición de tensión y corriente, entre otras”²². Algunos requisitos que enumera el RETIE²³ que se deben cumplir son:

- a. Realizar un análisis de riesgos donde se tenga en cuenta la tensión, la potencia de cortocircuito y el tiempo de despeje de la falla, para definir la categoría del riesgo que determina el elemento de protección a utilizar. el análisis de arco debe revisarse en periodos no mayores a cinco años o cuando se realicen modificaciones mayores.
- b. Fijar etiquetas donde se indique el nivel de riesgo y el equipo requerido.
- c. Realizar una correcta señalización de área de trabajo y de las zonas aledañas a esta.
- d. Tener una orden de trabajo firmada por la persona que autoriza.
- e. Usar equipo de protección personal certificado para el nivel de tensión y energía incidente involucrados.
- f. El límite de aproximación restringida debe ser señalado ya sea con una franja visible hecha con pintura reflectiva u otra señal que brinde un cerramiento temporal y facilite al personal no autorizado identificar el máximo acercamiento permitido.
- g. Cumplir con las distancias mínimas de aproximación a equipos energizados de las Tablas 13.7 o 13.8 y la Figura 13.4 según corresponda, los cuales son adaptadas de la NFPA 70E e IEEE 1584. estas distancias son barreras que buscan prevenir lesiones al trabajador son básicas para la seguridad eléctrica.

1.2.2 NFPA 70E 2015. El origen de la NFPA 70E se remota al 7 de enero de 1976 cuando el consejo de normas de *la National Fire Protection Association*, anuncio la conformación de manera oficial de un comité eléctrico para el desarrollo de esta norma, que se formó para colaborar con OSHA(*) en la preparación de normas de seguridad eléctrica, debido a diferentes factores en la aplicación de la NFPA 70: Código eléctrico nacional NEC, ya que este se destina principalmente a su uso por parte de quienes diseñan, instalan e inspecciona instalaciones eléctricas, algunas de las disposiciones detalladas en el NEC no están directamente relacionadas con la seguridad del empleado y por lo tanto, son de poco valor para las necesidades de OSHA²⁴. La primera edición se produjo en 1979, la versión 2015 es corresponde a la décima edición.

²² MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Resolución 90708, Op. cit. p 61.

²³ Ibid., p. 61-62.

²⁴ GRANADOS, Germán. NFPA 70 E, seguridad eléctrica en lugares de trabajo. SafetyWork [online]. 2016, [citado 2017-09-08], disponible desde internet: < <http://www.safetyworkla.com/new/NFPA-70-E-seguridad-electrica>>.

(*)Occupational Safety and Health Administration.

El propósito de esta norma es proveer de forma práctica un área de trabajo segura a los trabajadores en relación con los riesgos que se derivan del uso de la electricidad²⁵. La norma está conformada por tres capítulos y dieciséis anexos informativos; el capítulo 1, corresponde a prácticas de trabajo relacionadas con seguridad, el capítulo 2, requisitos de seguridad relacionados al mantenimiento, y finalmente el capítulo 3, requisitos de seguridad para equipos asociados.

1.3 ENERGÍA INCIDENTE

1.3.1 Definición. La energía incidente se define como la cantidad de energía térmica impuesta sobre una superficie a cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico²⁶. Se expresa típicamente en caloría por centímetro cuadrado (cal/cm^2), pero también se puede encontrar como Joule por centímetro cuadrado (J/cm^2) (*).

La energía incidente varía con la distancia a la fuente del arco, al igual que al entrar en una habitación con chimenea, cuanto más cerca estamos, mayor es la energía térmica. Las pruebas han indicado que una energía incidente de solo $1.2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ causa una quemadura de segundo grado a la piel desprotegida²⁷. En la Tabla 1 para diferentes valores de energía incidente se muestran los posibles efectos que se pueden percibir.

Tabla 1. Efectos y ejemplos para valores de energía incidente

Energía Incidente (cal/cm^2)	Resultado/Ejemplo
1	Equivalente a la punta del dedo expuesta a una llama de un encendedor de cigarrillos durante un segundo.
1.2	Cantidad de energía que causara instantáneamente una quemadura de segundo grado a la piel desnuda.
4	Cantidad de energía que produciría ignición instantánea en una camisa de algodón.
8	Cantidad de energía que causara instantáneamente una quemadura incurable de tercer grado.

Fuente: Manual de riesgo para la seguridad eléctrica Littelfuse®

²⁵ National Fire Protection Association. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. NFPA-70E. Quincy. La Asociación, 2015. p. 1-113

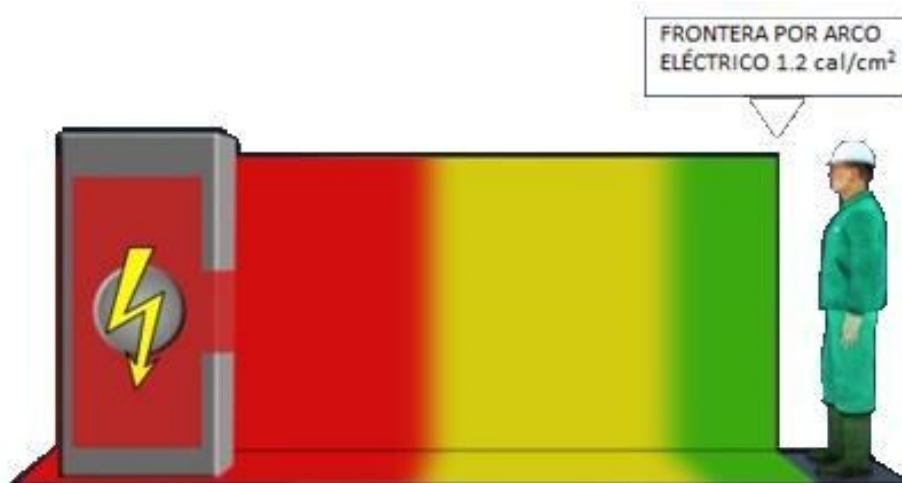
²⁶ Ibid., p. 13.

(*) $0.239 \text{ cal}/\text{cm}^2 = 1 \text{ J}/\text{cm}^2$

²⁷ Ibid., p. 12.

1.3.2 Frontera por arco eléctrico. “Cuando existe el riesgo de arco eléctrico, es el límite de aproximación a una distancia de la fuente potencial del arco, dentro de la cual una persona puede recibir una quemadura de segundo grado si ocurriera un arco eléctrico”²⁸. Como se mencionó en la Tabla 1, es posible sufrir una quemadura de segundo grado por exposición de la piel no protegida por encima del nivel de energía incidente de 1.2 cal/cm², es decir que las personas que no tengan elementos de protección personal resistentes al arco no deben sobrepasar dicho límite Figura 2.

Figura 2. Frontera por arco eléctrico.



Fuente: <https://www.buybettertraining.com/arc-flash-safety-video>

1.3.3 Métodos de cálculo de energía incidente. Varios grupos y organizaciones han desarrollado fórmulas para determinar la energía incidente, en el anexo informativo D de la NFPA 70E se resumen los principales métodos, en la Tabla 2 se especifica dichos métodos con las limitaciones de cada uno, en todos los casos, este valor depende de uno o más criterios propios del sistema como los son: corriente de cortocircuito disponible, tensión del sistema, espacio entre conductores, tiempo de apertura del dispositivo de sobrecorriente, dispositivo de protección.

²⁸Ibid., p. 11.

Tabla 2 Métodos de cálculo energía incidente y frontera por arco eléctrico

Fuente	Limitaciones/Parámetros
Lee, “The Other Electrical Hazard: Electric Arc Flash Burns”	Calcula la energía incidente y la frontera por arco eléctrico abierto al aire libre; conservador sobre los 600V y se hace más conservador al incrementar la tensión
Doughty, et al., “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems”	Calcula la energía incidente para arcos en sistemas trifásicos de 600 V y menores; aplica a corrientes de cortocircuito entre 16 kA y 50 kA
IEEE 1584, Guide for Performing Arc Flash Calculations	Calcula la energía incidente y la frontera por arco eléctrico para 208V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; corriente de cortocircuito de 700A a 106 kA y distancia entre conductores de 13mm a 152 mm
Doan, “ Arc Flash Calculations for Exposure to DC Systems”	Calcula la energía incidente para sistemas hasta 1000 V dc

Fuente: NFPA 70-E 2015 Anexo informativo D. Métodos de cálculo energía incidente

1.3.3.1 Método de cálculo de Ralph Lee. Los cálculos están basados en el peor caso de impedancia de arco, es decir cuando la corriente de arco es la misma corriente de falla. La frontera por arco eléctrico se calcula de acuerdo a las expresiones (1.1) o (1.2):

$$E_{arc} = 2.65 \times 10^6 \times \frac{I_{sc}^2}{2} \times t$$

Dónde: t :: Tiempo de exposición del arco, [s] (1.1)
 E_{arc} :: Frontera por arco eléctrico, [ft]

P_{sc} :: Potencia de falla sólida en el punto involucrado, [MVA] (1.2)
 P_{nom} :: Potencia nominal del transformador, [MVA]

::

Para transformadores con valores nominales menores a 0.75 MVA, multiplique los MVA nominales del transformador por 1.25²⁹.

La expresión (1.3) determinar la energía incidente a tensiones superiores de 600 V.

²⁹Ibid., p. 63.

$$= \frac{1}{2}$$

Dónde: (1.3)

$$E = \frac{1}{2} \times I^2 \times Z \times t$$

: Energía incidente, [cal/cm²]
 : Corriente de falla de cortocircuito sólido, [kA]
 :: Tensión fase-fase del sistema, [kV]
 :: Duración del arco, [s]
 : Distancia a la fuente de arco, [in]

1.3.3.2 Método de Doughty. Las siguientes ecuaciones se pueden utilizar para predecir la energía incidente producida por un arco trifásico en sistemas de hasta 600 V. Los parámetros necesarios para ser el cálculo son:

- La máxima corriente de falla de cortocircuito trifásico disponible en el equipo y el mínimo nivel de falla en el que el arco se sostendrá. (“Para sistemas de 480 V, la industria acepta como mínimo nivel para sostener una falla de arco el 38% de la corriente de falla de cortocircuito trifásico sólido disponible. La más alta exposición a energía incidente puede ocurrir en estos niveles más bajos donde el dispositivo de sobrecorriente puede requerir segundos o minutos para abrir”³⁰.)
- El tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba a la localización del posible arco) a la máxima corriente de cortocircuito y al mínimo nivel de falla en el cual el arco se sostendrá.
- La distancia del trabajador al arco potencial para la tarea que se va a realizar. Las distancias de trabajo típicas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Distancias de trabajo típicas.

Nivel de tensión	Equipo	Distancia mm (pulg.)
< 600 V	CCM y paneles de distribución	455(18)
< 600 V	Tablero de potencia	610(24)
> 600 V	Tablero de potencia	910(36)

Fuente: NFPA 70-E 2015 Anexo informativo D. Métodos de cálculo energía incidente

³⁰Ibid., p. 66.

La energía incidente estimada para un arco abierto o al aire libre está determinada por la ecuación (1.4).

Dónde:

$$E_{arc} = -1.9593 \cdot D^2 \cdot t \cdot I^2 \quad (1.4)$$

: Máxima energía incidente del arco abierto, [cal/cm²]
 : Distancia de trabajo, [in]
 : Duración del arco, [s]
 : Corriente de cortocircuito, [kA]

La energía incidente estimada para un arco cerrado o en caja cubica (20 pulgadas en cada lado, abierta en un extremo) está dada por la ecuación (1.5) que es aplicable a arcos eléctricos que provienen dentro de tableros de potencia, centro de control motores u otros envoltentes de equipos eléctricos.

Dónde:

$$E_{arc} = -1.4738 \cdot D^2 \cdot t \cdot I^2 \quad (1.5)$$

: Máxima energía incidente, [cal/cm²]
 : Distancia a los electrodos de arco, [in]
 : Duración del arco, [s]
 : Corriente de cortocircuito, [kA]

1.3.3.3 Método de cálculo de la IEEE 1584 2002. Los modelos para el cálculo de la frontera de arco eléctrico y energía incidente están basadas en análisis estadístico junto con un algoritmo de ajuste de curvas a partir de los datos de pruebas realizados por un grupo de trabajo de la IEEE³¹. Las limitaciones del sistema están especificados en la Tabla 2.

En este método se introduce el concepto de corriente de arco, la cual se define como la corriente que fluye por un camino de plasma a través del aire, esta corriente es menor que la corriente de falla franca debido a la impedancia del arco, especialmente para aplicaciones de menos de 1000 V. Para aplicaciones en media tensión, la corriente de arco es un poco inferior a la corriente de falla franca. Para determinar el tiempo de operación de los dispositivos de protección, se calcula la corriente de arco trifásico estimada³².

³¹Ibid., p. 70.

³² Ibid., p. 70.

La metodología que establece la norma se menciona a continuación:

1. Recolectar la información del sistema: Parámetros de líneas, transformadores, generadores, motores.
2. Determinar los modos de operación del sistema: Grupo electrógeno, fuentes de alimentación, condiciones de contingencia.
3. Determinar las corrientes de falla franca: Determinar la corriente de cortocircuito en el punto donde se requiera el análisis.
4. Determinar las corrientes de arco: Debido a la impedancia propia del arco el valor de la corriente de arco es menor que la corriente de cortocircuito.
5. Duración del arco: Se debe evaluar no solo el valor máximo de corriente de cortocircuito, ya que a menor corriente puede haber tiempos prolongados para el despeje de la falla.
6. Documentar las tensiones de la red y la clase de equipos: Dependiendo el tipo de equipo como: centro control motor, tablero de distribución, cable son determinadas diferentes variables necesarias en el cálculo.
7. Seleccionar las distancias de trabajo. Esta selección se realiza en base al tipo del equipo y la tensión del sistema.
8. Determinación de la energía incidente para los equipos. El valor de energía incidente en el equipo corresponde a las condiciones que dan el máximo valor calculado.
9. Determinación de la frontera de protección de arco para los equipos. este valor se calcula de acuerdo a las condiciones que dan el valor de máxima energía incidente.

Para aplicaciones con tensión nominal por debajo de 1kV para determinar la corriente de arco se utiliza la ecuación (1.6).

(1.6)

$$= + 0.662 + 0.0966 + 0.000526 + 0.5588 () -$$

Dónde: $0.00304 ()$

- : Corriente de arco, [kA]
- : -0.153 para arcos al aire libre
- 0.097 para arcos en una caja
- : Posible corriente de cortocircuito trifásico sólido (RMS simétrica), [kA]
- : Tensión del sistema, [kV]
- : Espacio entre conductores ver Tabla 4, [mm]

Para sistemas con tensión igual o mayor que 1 kV, tanto para arcos abiertos al aire como arcos en caja se utiliza la ecuación (1.7) para determinar la corriente de arco:

$$\log = 0.00402 + 0.983 \log \tag{1.7}$$

corriente de arco **0.85**
 Después se calcula para encontrar un segundo tiempo de arco. Esta segunda toma en consideración las variaciones en la corriente de arco. Calcular la

energía incidente utilizando los dos valores(**y 0.85**) y utilice el valor más alto.

Tabla 4. Factores para equipos y clases de tensión

Tensión del sistema (kV)	Tipo de equipo	Separación típica de conductores (mm)	Factor distancia X
0.208-1	Aire libre	10-40	2.000
	Tablero de potencia	32	1.473
	CCM's y Tableros	25	1.641
	Cables	13	2.000
>1-5	Aire libre	102	2.000
	Tablero de potencia	13-102	0.973
	Cables	13	2.000
>5-15	Aire libre	13-153	2.000
	Tablero de potencia	153	0.973
	cables	13	2.000

Fuente: NFPA 70-E 2015 Anexo informativo D. Métodos de cálculo energía incidente

En la Tabla 5 se especifica un ejemplo para cada clase de equipo.

Para determinar la energía incidente a la distancia de trabajo primero se calcula la energía incidente normalizada ecuación (1.8). Esta ecuación se basa en datos normalizados de tiempo de arco de 0.2 segundos y a una distancia del posible punto de arco a la persona de 610 mm³³.

Dónde:

$$\log = 1 + 2 + 1.081 \log + 0.0011 \quad (1.8)$$

: Energía incidente normalizada, [J/cm²]
 : -0.792 para arcos al aire libre / -0.555 para arcos en una caja
 : 0 para sistemas no puestos a tierra o puestos mediante alta resistente -0.113 para sistemas sólidamente puestos a tierra
 : Separación entre conductores ver Tabla 4, [mm]

³³Ibid., p. 67.

Tabla 5. Tipos de instalación

Equipo	Ejemplo
Aire libre	
Centro control motor (CCM)	
Tablero de potencia	
Cable	
Tablero baja tensión	

Fuente: Autor.

La expresión (1.9) convierte el valor de la energía incidente de lo normalizado a la correspondiente al punto bajo análisis.

$$E_{inc} = 4.184 \cdot \left(\frac{E_{norm}}{0.2} \right)^{1.5} \cdot (d)^{-1.5} \quad (1.9)$$

- Dónde:*
- Energía incidente, [J/cm^2]
 - 1.0 para tensiones superiores a 1 kV
 - 1.5 para tensiones iguales o menores a 1 kV
 - Energía incidente normalizada, [J/cm^2]
 - Tiempo de arco, [s]
 - Distancia del arco a la persona (distancia de trabajo) ver Tabla 6 para distancias típicas, [mm]
 - Exponente de distancia ver Tabla 4.

Tabla 6. Distancias de trabajo típicas

Clases de equipo	Distancias típicas de trabajo*(mm)
Tablero de potencia 15 kV	910
Tablero de distribución 5 kV	910
Tablero de distribución de bajo voltaje	610
CCM's y paneles de bajo voltaje	455
Cable	455
Otro	A ser determinado en campo

* Las distancias típicas de trabajo son la suma entre el trabajador, el frente del equipo y la distancia desde el frente del equipo a la potencial fuente de arco dentro del equipo

Fuente: NFPA 70-E 2015 Anexo informativo D. Métodos de cálculo energía incidente

La expresión (1.10) es un modelo derivado teóricamente para sistemas trifásicos en subestaciones al aire libre, sistemas de transmisión al aire libre y sistemas de distribución. El modelo obtenido teóricamente tiene el propósito de utilizarse en aplicaciones donde las fallas llegan a ser trifásicas. Donde no es posible o factible que las fallas lleguen a ser trifásicas o donde se encuentran sistemas monofásicos, esta ecuación probablemente dará resultados conservadores³⁴. La ecuación (1.10) se puede aplicar para calcular la energía incidente en casos en los que la tensión es mayor de 15 kV o el espacio de separación esta fuera del rango.

$$D \text{ (mm)} = 2.142 \times 10^6 \cdot \left(\frac{E \cdot V^2 \cdot I \cdot t}{V^2} \right)^{0.2} \quad (1.10)$$

Dónde:

- : Energía incidente, [J/cm²]
- : Tensión del sistema, [kV]
- : Corriente de falla trifásica sólida, [kA]
- : Tiempo de arco, [s]

: Distancia del arco a la persona (distancia de trabajo), [mm]

Para tensiones mayores a 15 kV, la corriente de falla de arco y la corriente de falla franca se consideran iguales³⁵.

La distancia de protección contra arco eléctrico es la distancia a la cual es probable que una persona reciba una quemadura de segundo grado. El inicio de una quemadura de segundo grado se asume que es cuando la piel recibe una energía incidente de 1.2 J/cm²

³⁴ Ibid., p. 70.

³⁵ Ibid., p. 68.

cal/cm². Para la ecuación obtenida empíricamente se utiliza la ecuación (1.11) y para la ecuación obtenida teóricamente la expresión (1.12):

$$= \sqrt{2.142 \times 10^6} \quad (\rightarrow)$$

Frontera por arco, [mm] (1.11)

1.0 para tensiones superiores a 1 kV

1.5 para tensiones iguales o menores que 1 kV

Energía incidente normalizada, [J/cm²] (1.12)

Tiempo duración del arco, [s] Exponente de

Donde: distancia ver Tabla 4

- : Energía incidente, [J/cm²]
- : Tensión del sistema, [kV]
- : Corriente de cortocircuito sólido, [kA]
- :
- :
- :
- :
- ::

1.3.3.4 Método de cálculo para sistema DC (Método de la potencia máxima). El método se basa en el concepto de que la potencia máxima posible en un arco de corriente directa se producirá cuando la tensión de formación del arco sea la mitad de la tensión del sistema³⁶. La expresión (1.13) determina la corriente de arco y por medio de la expresión (1.14) se determina la energía incidente.

Dónde:

::

:

Corriente de formación de arco, [A]

Corriente de falla franca
en el sistema, [A]
Energía incidente, (1.13)
[cal/cm²] (1.14)
Tensión del sistema, [V]
Tiempo de duración del
arco, [s]
Distancia de trabajo,
[cm]

³⁶Ibid., p. 71.

Para exposición donde el arco está en una caja o envoltente, sería prudente aplicar un factor de multiplicación de 3 sobre el valor de la energía incidente resultante³⁷.

1.4 LÍMITES DE APROXIMACIÓN

“El mantener una segura distancia de aproximación a los conductores o partes de circuitos eléctricos energizados expuestos, es un medio efectivo para mantener la seguridad eléctrica. En la medida en que la distancia entre la persona y conductores o partes de circuitos energizados expuestos disminuye, aumenta el potencial de accidentes eléctricos”³⁸. Para prevenir accidentes solo el personal calificado debe intervenir en los conductores **energizados**, “personal calificado se define como una persona con habilidades y conocimientos relacionados con la construcción y el funcionamiento de las instalaciones y los equipos eléctricos y que ha recibido capacitación en seguridad para reconocer y evitar los peligros implicados”³⁹.

Los límites de aproximación están dirigidos a las prácticas seguras de trabajo que debe tomar las personas cuando van a desarrollar sus tareas cerca de una parte energizada (Figura 3) y se especifican a continuación:

Frontera por arco eléctrico. Las personas no deben cruzar la frontera por arco eléctrico a menos que estén vestidos con ropa de protección personal resistente al arco apropiado y se encuentre bajo la estricta supervisión de una persona calificada⁴⁰.

Frontera de aproximación limitada. Límite de aproximación a una distancia de un conductor expuesto o parte del circuito energizado dentro del cual aumenta el riesgo de choque. Las personas no calificadas deben permanecer afuera de esta frontera incluyendo el objeto conductor más largo que se esté manipulando. Las personas no calificadas deberían cruzar la frontera de aproximación limitada únicamente cuando se encuentre continuamente supervisada por una persona calificada⁴¹.

Para que una persona atraviese la frontera limitada debe cumplir con lo siguiente:

- estar calificado para realizar la tarea
- ser capaz de identificar los peligros y el riesgo asociados a las tareas a ser realizadas

³⁷ Ibid., p. 71.

³⁸ FLORES, Cesar. Seguridad con la electricidad Todo lo que hay que conocer para evitar accidentes eléctricos [online], abril 2011 [citado 27 febrero 2017]. Disponible desde internet: <www.seguridadconelectricidad.blogspot.com.co/2011/04/limites-de-aproximacion.html>.

³⁹ NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, NFPA 70E, Op. cit. p 61.

⁴⁰ Ibid., p. 61.

⁴¹ Ibid., p. 61.

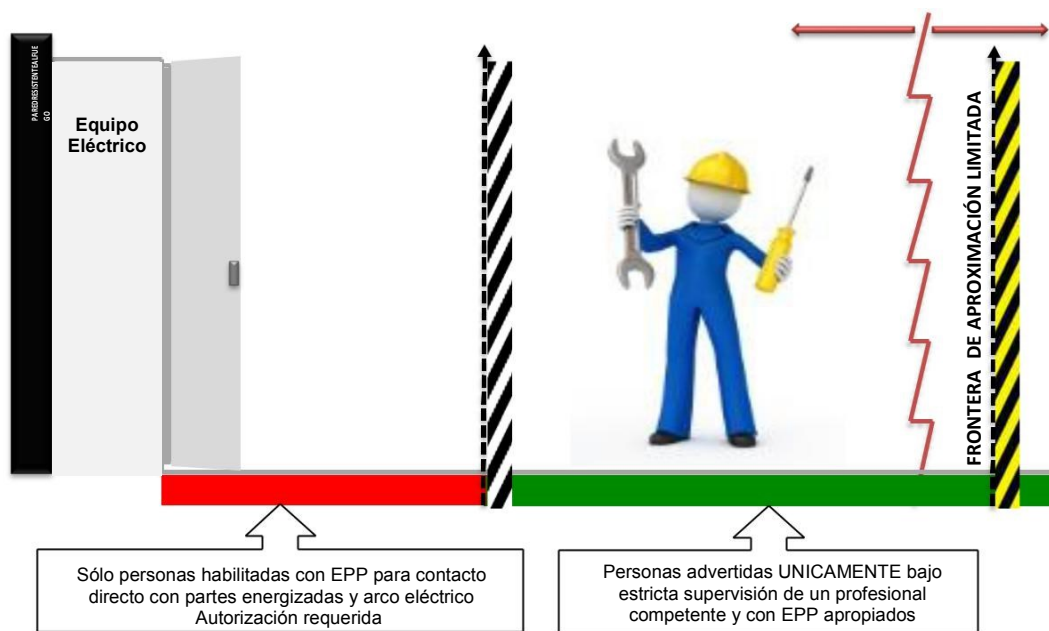
Frontera de Aproximación Restringida. Límite de aproximación a una distancia de un conductor expuesto o parte de circuito energizado dentro del cual aumenta el riesgo de choque, debido a arco eléctrico ocasionado por movimientos involuntarios, para personal que trabaja cerca del conductor eléctrico o parte de circuito energizado. Bajo ninguna circunstancia una persona no calificada debería cruzar la frontera de aproximación restringida, donde se requiere técnicas o equipos especiales de protección contra choque⁴².

Cuando una persona calificada cruce la frontera de aproximación restringida debe:

- Tener un permiso de trabajo energizado autorizado por el responsable.
- utilizar elementos de protección personas de acuerdo a la tensión y al nivel de energía incidente
- Use herramientas y equipos aislados.

En ciertas circunstancias, la frontera por arco eléctrico puede ser una distancia, al conductor eléctrico o parte energizada, mayor que la frontera de aproximación limitada, debido a que estas son independientes entre sí.

Figura 3. Límites de proximidad.



Fuente: Documento borrador proyecto de modificación al RETIE

⁴²Ibid., p. 61.

1.5 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE ORIGEN ELÉCTRICO DE ACUERDO A LA NORMA NFPA 70E

1.5.1 Evaluación del riesgo de electrocución. La evaluación del riesgo de choque deberá determinar la tensión a la cual estará expuesto el personal, las distancias de aproximación limitada y restringida y el equipo de protección personal necesario para minimizar la posibilidad de choque eléctrico al personal⁴³.

“Los empleados deben utilizar guantes aislantes de hule con protectores de cuero donde exista peligro de lesión en las manos por choque eléctrico debido al contacto con conductores o partes de circuito eléctrico energizado. Los empleados deben utilizar guantes aislantes de hule, con protectores de cuero y mangas aislantes de hule donde exista peligro de sufrir lesiones por choque eléctrico en manos y brazos debido al contacto con conductores o partes del circuito eléctrico energizado. Los guantes de hule deben tener un nivel nominal de aislamiento (clase) acorde al **nivel de tensión al que estarán expuesto**”⁴⁴.

La selección de clase de guantes se realiza de acuerdo al estándar ASTM D120 de acuerdo al nivel de tensión Tabla 7.

Tabla 7. Clases de guantes dieléctricos estándar ASTM D120.

Clase	Máxima tensión de uso AC/DC* [V]
00	500/750*
0	1000/1500*
1	7500/11250*
2	17000/25500*
3	26500/39750*
4	36000/54000*

* Máxima tensión que soporta con protectores de cuero.

Fuente: Estándar ASTM D120- 02a

Las fronteras de protección contra choque identificadas como fronteras de aproximación limitada y restringida deben ser aplicadas a donde el personal que se aproxima está expuesto a conductores eléctricos o partes de circuito energizado. Estas distancias se determinan a partir del nivel de tensión mediante el uso de la Tabla 8 y 9 tomadas del RETIE.

⁴³ Ibid., p. 25.

⁴⁴ Ibid., p. 30.

Tabla 8. Fronteras de aproximación a conductores o partes energizadas de circuitos eléctricos energizados para protección contra choque eléctrico en sistemas de corriente alterna.

Tensión nominal del sistema (fase – fase)	Frontera de aproximación Limitada [m]		Frontera de aproximación Restringida [m]
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta	
50 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto
301 V – 750 V	3,0	1,0	0,30
751 V – 15 kV	3,0	1,5	0,7
15,1 kV – 36 kV	3,0	1,8	0,8
36,1 kV – 46 kV	3,0	2,5	0,8
46,1 kV - 72,5 kV	3,0	2,5	1,0
72,6 kV – 121 kV	3,3	2,5	1,0
138 kV - 145 kV	3,4	3,0	1,2
161 kV - 169 kV	3,6	3,6	1,3
230 kV - 242 kV	4,0	4,0	1,7
345 kV - 362 kV	4,7	4,7	2,8
500 kV – 550 kV	5,8	5,8	3,6

Fuente: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE

Tabla 9. Fronteras de aproximación a conductores o partes energizadas de circuitos eléctricos energizados para protección contra choque eléctrico en sistemas de corriente continua.

Tensión nominal	Frontera de aproximación Limitada [m]		Frontera de aproximación Restringida [m]
	Parte móvil expuesta	Parte fija expuesta	
100 V – 300 V	3,0	1,0	Evitar contacto
301 V – 1 kV	3,0	1,0	0,3
1,1 kV – 5 kV	3,0	1,5	0,5
5,1 kV – 15 kV	3,0	1,5	0,7
15,1 kV – 45 kV	3,0	2,5	0,8
45,1 kV – 75 kV	3,0	2,5	1,0
75,1 kV – 150 kV	3,3	3,0	1,2
150,1 kV – 250 kV	3,6	3,6	1,6
250,1 kV – 500 kV	6,0	6,0	3,5
500,1 kV – 800 kV	8,0	8,0	5,0

Fuente: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE

1.5.2 Evaluación del riesgo de arco eléctrico. La evaluación del riesgo de arco eléctrico deberá determinar si existe el riesgo de un arco eléctrico, si el riesgo existe, los resultados de la evaluación del riesgo de arco son: energía incidente disponible a la distancia de trabajo o categoría de los EPP de arco eléctrico, descripción de los elemento de protección personal resistente al arco necesarios, frontera por arco eléctrico⁴⁵.

La evaluación debe ser actualizada cuando se realice una modificación o renovación importante. se revisara periódicamente en intervalos que no excedan de 5 años, para tener en cuenta los cambio en el sistema de distribución eléctrica que podrían afectar los resultados de la evaluación del riesgo de arco eléctrico⁴⁶.

La vestimenta resistente al arco eléctrico se determina de dos maneras:

1. Método de cálculo: cuando la energía incidente y la frontera por arco eléctrico se determinen de acuerdo a alguno de los métodos de la sección 1.3.3 la vestimenta resistente al arco y los elementos de protección personal se deben seleccionar de acuerdo al anexo H de la NFPA 70E 2015 *Guía orientativa para la selección de vestimenta protectora y otros equipos de protección personal*, disponible en el Anexo A de este documento⁴⁷.
2. Categorización del riesgo: Si en el equipo se realiza alguna de las tareas mencionadas en la Tabla 130.7(C)(15)(A)(a) *Identificación de riesgo de arco eléctrico en sistemas de corriente alterna y continua* y además los valores de tensión, corriente de cortocircuito , tiempo de despeje de falla y distancia de trabajo están en el rango especificado en la Tablas 130.7(C)(15)(A)(b) *Categoría de los EPP para el riesgo de arco eléctrico en sistemas de corriente alterna* o 130.7(C)(15)(B) *Categoría de los EPP para el riesgo de arco eléctrico en sistemas de corriente continua*, estas Tablas determinan la categoría del riesgo en una de las cuatro categorías como lo indica la Figura 5 donde ya está especificada la vestimenta protectora para cada categoría en la Tabla 130.7(C)(16) *Elementos de protección personal* , este material se encuentran en el Anexo B de este documento⁴⁸.

⁴⁵Ibid., p. 26.

⁴⁶ Ibid., p. 26.

⁴⁷ Ibid., p. 28.

⁴⁸ Ibid., p. 28.

Figura 4. Vestimenta resistente al arco y EPP de acuerdo a la categorización del riesgo.

CATEGORIA DE RIESGO 1	2	3	4
<p>Minimo valor de resistencia al arco 4 cal/cm²</p> <p>Ropa resistente al arco</p> <ul style="list-style-type: none"> Camisa mangas largas y pantalones (AR) u overol (AR) Protector facial o capucha de traje de proteccion contra arco eléctrico <p>Equipos de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> Casco Anteojos o gafas de seguridad Proteccion auditiva (Tapones) Guantes de cuero uso industrial Calzado de trabajo de cuero 	<p>Minimo valor de resistencia al arco 8 cal/cm²</p> <p>Ropa resistente al arco</p> <ul style="list-style-type: none"> Camisa mangas largas y pantalones (AR) u overol (AR) Capucha de traje de proteccion contra arco eléctrico o protector facial y balaclava Chaqueta, Parka, prendas impermeables o forros de casco (AR) (segun sea necesario) <p>Equipos de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> Casco Anteojos o gafas de seguridad Proteccion auditiva (Tapones) Guantes de cuero uso industrial Calzado de trabajo de cuero 	<p>Minimo valor de resistencia al arco 25 cal/cm²</p> <p>Ropa resistente al arco</p> <ul style="list-style-type: none"> Segun se requiera: (AR) camisa mangas largas, (AR) pantalones, (AR) Overol, (AR) chaqueta de trahe, (AR) Pantalones de traje. (AR) Capuha de traje (AR) Guantes Chaqueta, Parka, prendas impermeables o forros de casco (AR) (segun sea necesario) <p>Equipos de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> Casco Anteojos o gafas de seguridad Proteccion auditiva (Tapones) Calzado de trabajo de cuero 	<p>Minimo valor de resistencia al arco 40 cal/cm²</p> <p>Ropa resistente al arco</p> <ul style="list-style-type: none"> Segun se requiera: (AR) camisa mangas largas, (AR) pantalones, (AR) Overol, (AR) chaqueta de trahe, (AR) Pantalones de traje. (AR) Capuha de traje (AR) Guantes Chaqueta, Parka, prendas impermeables o forros de casco (AR) (segun sea necesario) <p>Equipos de protección:</p> <ul style="list-style-type: none"> Casco Anteojos o gafas de seguridad Proteccion auditiva (Tapones) Calzado de trabajo de cuero 

Modificado de: Arc Flash PPE Categories from NFPA 70E (2015) GRAPHIC PRODUCT

1.5.3 Estado del arte evaluación del riesgo de arco eléctrico

1.5.3.1 Antecedentes en el mundo. Estados Unidos es uno de los países con las prácticas de seguridad eléctrica más estrictas, y fue en este país donde surgió la evaluación del riesgo de arco eléctrico⁴⁹, debido a esto la mayoría de la literatura corresponde a empresas americanas con bastante experiencia en aplicación de las normas NFPA 70E e IEEE 1584, por ejemplo la compañía BRAINFILLER® de Jim Phillips quien es autor de una serie de artículos con los aspectos más relevantes a la hora de la aplicación de la evaluación del riesgo de arco eléctrico. La importancia de Phillips es la experiencia a lo largo de más de 35 años, donde ha ayudado a decenas de miles de personas en todo el mundo a comprender el diseño, el análisis y la seguridad del sistema de energía eléctrica, además es vicepresidente de la IEEE 1584 y miembro del comité directivo IEEE/NFPA Arc Flash Collaborative Research Project y fundador del sitio web Arc flash fórum.com una comunidad global para el análisis de arco eléctrico y la seguridad eléctrica⁵⁰.

En la parte académica hay trabajos de grado que aplican el estudio de arco eléctrico en plantas industriales como: **“Estudio de “arc flash” en una instalación para centro de datos en baja tensión utilizando la norma IEEE 1584-2002⁵¹”** de la Universidad de Costa Rica, **“Estudio de riesgo de arco eléctrico en la planta Ford motor de Venezuela S.A.⁵²”** de la universidad Simón Bolívar, **“Estudio de riesgo por arco eléctrico para un red industrial apegado a la normatividad aplicable para seleccionar el equipo de protección personal adecuado y minimizar riesgos por descarga de arco eléctrico⁵³”** del Instituto politécnico nacional de México.

1.5.3.2 Antecedentes en Colombia. En Colombia el estudio de arco eléctrico es un tema no muy conocido, pero que recientemente ha tomado fuerza por la exigencia que hace el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas, de la información consultada resalta el documento titulado: Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía elaborado por interconexión eléctrica S.A. (ISA),

⁴⁹ PHILLIPS, Jim. Global use of IEEE1584 [online], enero 2018 [citado 05 Marzo 2018]. Disponible desde internet: <www.brainfiller.com/2018/01/06/global-use-ieee-1584>.

⁵⁰ Brainfiller. About Jim Phillips [online], [citado 05 Marzo 2018]. Disponible desde internet: <www.brainfiller.com/about-jim-phillips/>.

⁵¹ INDUMI, Jeannette. **Estudio de “arc flash” en una instalación para centro de datos en baja tensión utilizando** la norma IEEE 1584-2002. Trabajo de grado Bachiller en ingeniería eléctrica. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería eléctrica, 2013. 185 p.

⁵² LOPEZ, Miguel. Estudio de riesgo de arco eléctrico en la planta Ford motor de Venezuela, S.A. Trabajo de grado ingeniería eléctrica. Universidad Simón Bolívar. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería eléctrica, 2006. 115 p.

⁵³ BAUTISTA, Víctor. ZARATE, Edgar. Estudio de riesgo por arco eléctrico para una red industrial apegado a la normatividad aplicable para seleccionar el equipo de protección personal adecuado y minimizar riesgos por descarga y arco eléctrico. Instituto politécnico nacional. Escuela superior de ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2012. 131 p.

el cual tiene como objetivo “plantear los criterios para la identificación y evaluación del riesgo por arco eléctrico en las instalaciones y equipos de las subestaciones de transporte de energía”, por la similitud con el tipo de instalación eléctrica que se analiza.

La empresa Colombiana Potencia y tecnologías incorporadas S.A. en una de sus áreas de negocio se dedica al análisis de sistemas de potencia haciendo uso del Software ETAP⁵⁴, para dar a conocer esta herramienta en la industria realizan charlas de sensibilización del riesgo de arco eléctrico con la normativa Colombiana en las principales capitales del país, en la que se tuvo la oportunidad de participar como asistente en la ciudad de Bogotá. Además, durante la pasantía también se participó como asistente a un entrenamiento del software ETAP con una duración de 40 Horas también en la ciudad de Bogotá.

⁵⁴Potencia y tecnología incorporada S.A. Productos [online], [citado 05 Marzo 2018]. Disponible desde internet: < <https://www.pti-sa.com.co/productos>>.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA APLICADA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO Y RIESGO DE ELECTROCUCIÓN

***“Nuestras virtudes y nuestros defectos son inseparables, como la fuerza y la materia.
Cuando se separan, el hombre deja de existir”***

Nikola Tesla

En el capítulo 2 se expone la metodología aplicada en la evaluación del riesgo por arco eléctrico y electrocución cuando se realizan trabajo cerca a partes energizadas, partiendo de la identificación del riesgo, levantamiento y procesamientos de la información, cálculo de cortocircuito, determinación de la energía incidente, especificación de la vestimenta protectora y del etiquetado.

2. METODOLOGÍA APLICADA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO Y RIESGO DE ELECTROCUCIÓN

Para realizar la evaluación de riesgo por arco según la NFPA 70E 2015 es necesario conocer primero la corriente de cortocircuito disponible, tiempo de despeje de falla y distancia de trabajo, pero esta norma no especifica como determinarlos, por lo que la evaluación del riesgo se complementa con la metodología especificada en la norma IEEE 1584 2002 (numeral 1.3.3.) que proporciona técnicas para que los diseñadores y operadores de instalaciones puedan aplicar en la determinación de la frontera por arco eléctrico y la energía incidente⁵⁵.

Al unificar los requerimientos de la NFPA 70E con la metodología para la determinación de la frontera por arco eléctrico y la energía incidente del estándar IEEE 1584, La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo se presenta en la Figura 5, básicamente se divide en 8 etapas que son:

Paso 1: Identificar los equipos donde es necesario realizar la evaluación del riesgo de arco eléctrico ya que solo es necesario para aquellos lugares donde los trabajadores están expuestos al riesgo.

Paso 2: Recolectar los datos e información del sistema e instalaciones, los parámetros de los equipos a recolectar son similares a los necesarios para un estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones

Paso 3: Procesar la información. Para este estudio se utilizó el software ETAP Powering Succes versión 12.6.

Paso 4: Determinar las corrientes de falla trifásica, para el estudio de arco eléctrico solo se consideran las corrientes de falla trifásica franca en cada uno de los puntos de interés.

Paso 5: Determinar la energía incidente más alta sobre los equipos.

Paso 6: Determinar frontera de aproximación limitada y restringida.

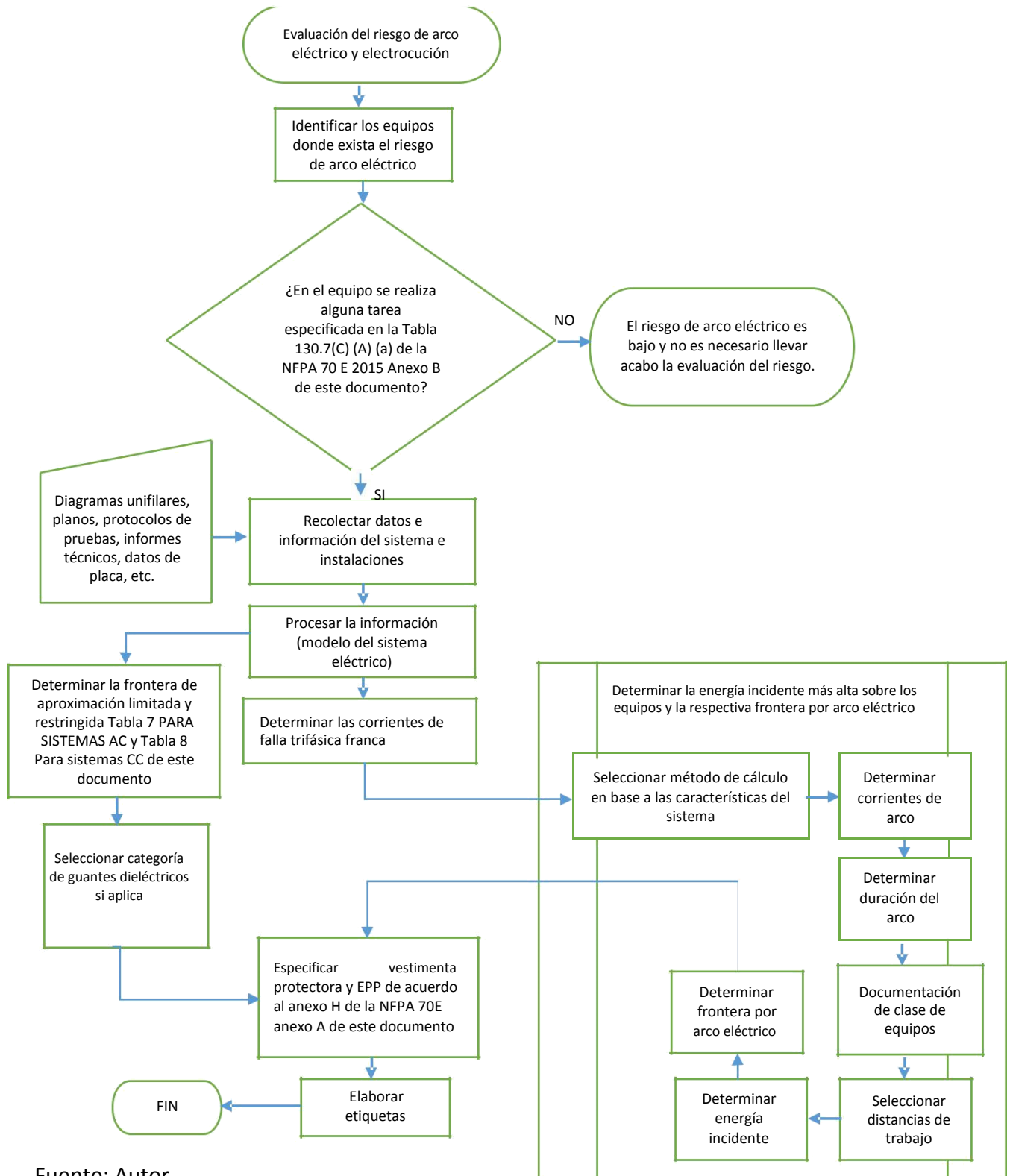
Paso 7: Especificar la vestimenta protectora y EPP de acuerdo al anexo H de NFPA 70E.

Paso 8: Elaborar Etiquetas, cada elemento bajo estudio debe tener una etiqueta donde advierta al trabajador sobre el riesgo de arco eléctrico y electrocución donde se incluye información para mitigar dichos riesgos de acuerdo a los requerimiento del numeral 130.5 (C) de la NFPA 70E.

⁵⁵ INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE 1584. New York. El Instituto, 2002. p. 1.

Figura 5. Metodología aplicada para la evaluación del riesgo de arco eléctrico.

Figura 5. Metodología aplicada para la evaluación del riesgo de arco eléctrico y electrocución.



Fuente: Autor.

2.1 IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo de arco eléctrico solo es necesario cuando un equipo energizado es examinado, se le da servicio, mantenimiento o se le ajusta de alguna manera, por lo que pueda que no sea necesario realizar la evaluación para cada pieza del equipo en el sistema, la IEEE 1584 recomienda ignorar el paneles de distribución con tensiones menores o iguales a 208 V si el transformador que la alimenta es inferior a 125 kVA ya que el arco probablemente no sea sostenido a tensiones o corrientes de fallas menores.

La Tabla 130.7(C) (15) (A) (a) de la NFPA7E 2015 Anexo B se puede usar para identificar el riesgo de arco eléctrico en sistemas de corriente alterna y continua para un equipo en particular en función de las tareas que se realizan y su estado de instalación y mantenimiento. Esto se puede complementar con las actividades que especifica el RETIE las cuales son: “cambio de interruptores o partes de él, intervención sobre transformadores de corriente, mantenimiento de barrajes, instalación y retiro de medidores, apertura de condensadores, macromediciones, medición de tensión y corriente, entre otras”⁵⁶.

2.2 RECOLECTAR LOS DATOS E INFORMACIÓN DEL SISTEMA E INSTALACIONES

Los parámetros de los equipos a recolectar son similares a los necesarios para un estudio de cortocircuito, para lo cual se requiere un diagrama unifilar, información de los parámetros técnicos de transformadores, generadores, líneas de transmisión, cables, motores e interruptores. En el anexo C se especifica la información requerida típicamente para cada equipo.

Respecto a la información de los dispositivos de protección, en la Tabla 10 se especifican la información que se debe tener.




A los equipos en los cuales existe el riesgo de arco eléctrico, es necesario determinar el tipo de dispositivo, conexión a tierra, espacio entre conductores, este último parámetro se puede obtener de la Tabla 4 sección 1.3.3.3; esta información es necesaria cuando se aplica el método de cálculo de la IEEE 1584.

Para cada equipo es necesario determinar la distancia de trabajo Figura 6, la cual es la suma de la distancia entre el trabajador y el frente del equipo y el frente del equipo y la fuente

⁵⁶MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Resolución 90708, Op. cit. p 61.

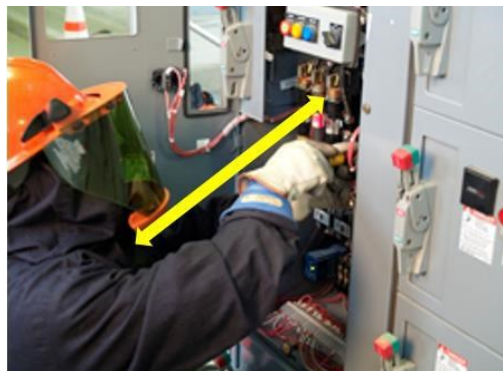
potencial de arco, en la Tabla 6 sección 1.3.3.3 se especifican los valores típicos para cada equipo.

Tabla 10. Información necesaria de los dispositivos de protección de sobrecorriente

Dispositivo de protección	Información
 <p data-bbox="613 625 862 657">Relé sobrecorriente</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo -Relación de CT'S -Pickup -Dial -Tipo de Curva
 <p data-bbox="695 856 781 888">Fusible</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Instantáneo. -Tipo -Corriente nominal -Voltaje -Corriente Máxima de Paso
 <p data-bbox="613 1073 862 1161">Interruptores termo- magnéticos</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo -Tiempo de despeje de falla -Pickup -Delay -Instantáneo

Fuente: Autor.

Figura 6. Distancia de trabajo.



Modificado de: PINILLA, Sergio. La necesidad de protección ante la exposición a un Arc Flash. Revista HSEC.

Es necesario también definir los diferentes modos de operación del sistema en base a los diagramas unifilares. Las alimentaciones paralelas pueden aumentar en gran medida la corriente de falla y el resultado del cálculo de la energía incidente.

2.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para sistemas eléctricos pequeños es viable realizar un análisis de arco eléctrico a mano, pero para sistemas eléctricos complejos y extensos, un cálculo a mano sería una tarea desgastante y que conlleva una gran inversión de tiempo, dando pie a cometer errores, además de la tediosa tarea de manejar tanta información, además de que cualquier modificación o cambio de escenario en el sistema cambiara totalmente la red por lo que se tendría que repetir el cálculo un número considerable de veces. Desde hace unos años con el desarrollo de la informática han surgido diferentes softwares especializados para el sector eléctrico; la compañía Operation Technology, Inc. fundada en 1986 ha impulsado el desarrollo del Software ETAP por más de 30 años⁵⁷.

ETAP es un software para el modelamiento de sistemas eléctricos, considerada como una de las herramientas “más completa de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas de potencia eléctricos de generación, transmisión, distribución e industriales. ETAP ofrece una serie de programas totalmente integrados incluyendo flujo de carga, cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones, dimensionado de cables, estabilidad transitoria, arco eléctrico, arranque de motores, análisis de armónicos, entre otros”⁵⁸. “Asimismo se escogió este paquete por su facilidad en el manejo y ser muy versátil en la presentación de datos y resultados de la simulación”⁵⁹.

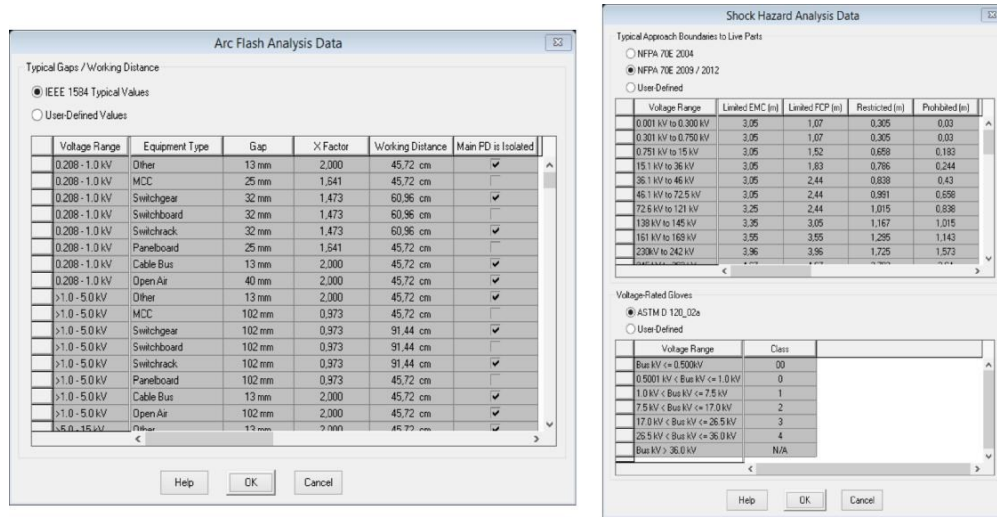
Para la determinación de la energía incidente ETAP cuenta con los valores típicos de la norma IEEE 1584 Figura 7 para la selección de la distancia entre conductores (GAP), factor X y distancia de trabajo, cuando el cálculo se hace en base a dicha norma; además determina la frontera de aproximación limitada y restringida en base a los valores de la NFPA 70E que los mismos que especifica el RETIE y la clase de los guantes dieléctricos Figura 7.

⁵⁷ETAP POWERING SUCCESS. About ETAP [En línea]. < <https://etap.com/company/about-us> > [citado en 26 Septiembre de 2016]

⁵⁸SILVATECH S.A. Software ETAP [En línea]. <www.silvatech.com.co/software-etap.html> [citado en 01 Marzo de 2016]

⁵⁹VASQUEZ, Victor. Estudio Comparativo de las normas IEC y ANSI para cálculo de corto circuito. Trabajo de grado Maestro en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. Departamento de ingeniería eléctrica, 2007. p

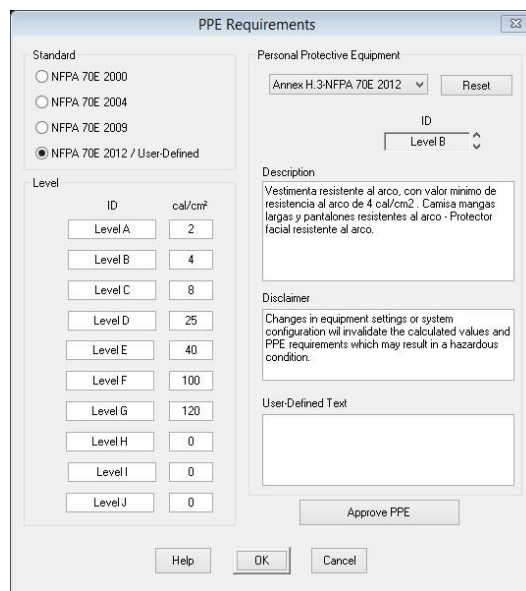
Figura 7. Valores típicos de la IEEE 1584 en ETAP.



Fuente: Autor.

ETAP también permite la selección de la vestimenta resistente al arco y los EPP en base al anexo H de la NFPA 70E Figura 8, estos parámetros se pueden editar para cumplir con lo definido en la NFPA 70E 2015 que elimina la categoría 0 presente en antiguas versiones de la norma.

Figura 8. Descripción de los EPP en ETAP.



Fuente: Autor.

2.4 CORTOCIRCUITO

El software ETAP V12.6 integra dos estándares para el cálculo de corto circuito “trifásico”, “monofásico a tierra”, “bifásico” y “bifásico a tierra”, una es la ANSI/IEEE (series C37) y la otra es la IEC 60909; para el desarrollo de este proyecto se basa en el estándar ANSI/IEEE. Norma de origen americano, que determina el procedimiento a seguir en los cálculos de corriente de cortocircuito en estanos unidos y en los países, que por influencia tecnológica de aquel país⁶⁰. Este estándar se adopta principalmente porque el módulo de análisis de arco eléctrico de ETAP de esta versión solo está disponible con este estándar; pero tiene una ventaja importante frente al estándar IEC, y es que este es más sencillo en su procedimiento debido a su carácter eminentemente práctico, por su modelación más sencilla requiere menos datos con el consecuente ahorro de tiempo y de inversión en la búsqueda⁶¹.

Para el estudio de arco eléctrico solo se consideran las corrientes de falla trifásica en cada uno de los puntos de interés, una de las razones para tomar en consideración solo las corrientes trifásicas es que generalmente dan la energía de cortocircuito más alta posible y representan el peor de los casos, otra razón importante es que la experiencia ha demostrado que las fallas de arco en equipo o al aire que comienzas como fallas línea a tierra pueden escalar rápidamente a fallas trifásicas a medida que el aire se ioniza a través de las fases, esta progresión de monofásico a trifásico ocurre generalmente en unos pocos ciclos⁶².

Es necesario determinar las corrientes de falla máxima y mínima, debida a que la corriente de falla más alta no implica necesariamente el mayor peligro posible de arco eléctrico porque la energía incidente es una función del tiempo de arco, que puede ser una función inversamente proporcional de la corriente de arco⁶³.

⁶⁰FRANK, Mercede. How to perform short-circuit calculations-Part 1. EC&M, p46-50, 1995. citado por: VASQUEZ, Victor. Estudio Comparativo de las normas IEC y ANSI para cálculo de corto circuito. Trabajo de grado Maestro en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. Departamento de ingeniería eléctrica, 2007. 117 p.

⁶¹VASQUEZ, Victor. Estudio Comparativo de las normas IEC y ANSI para cálculo de corto circuito. Trabajo de grado Maestro en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. Departamento de ingeniería eléctrica, 2007. 117 p.

⁶²ST. PIERRE, Conrad, *et al.* Op. cit., p. 33.

⁶³ *Ibid.*, p. 33.

En el caso de un elemento con múltiples alimentadores se debe tener en cuenta la porción de la corriente que fluye por cada alimentador para determinar el tiempo de despeje de la falla.

2.4.1 Descripción del Método ANSI/IEEE. Se considera una fuente de tensión equivalente en la ubicación de la falla, que es igual a la tensión de pre-falla, reemplaza todas las fuentes de tensión externas y tensión interna de la máquina. Todas las máquinas son representadas por sus impedancias internas. Las capacitancias de las líneas y cargas estáticas se ignoran. Las impedancias se asumen balanceadas, y el método de las componentes simétricas se usa para el cálculo de las fallas desbalanceadas⁶⁴.

“El cálculo de la corriente de falla en los diferentes periodos de la onda de corto circuito conduce a definir tres intervalos de tiempo durante el tiempo en que la falla este presente. Cada uno de estos periodos determinara tres redes, para la norma ANSI/IEEE las redes son: La red de Primer ciclo (también llamada momentánea o primera red), la red de interrupción (segunda red o red de apertura de contactos) y la red de 30 ciclos (tercera red o red de estado permanente). Estas tres redes se forman con las reactancias (impedancias) de los elementos que intervienen en cada red. La única diferencia entre una red y la otra es el valor que se le asigne a las reactancias de cada máquina rotatoria. Las reactancias de los elementos pasivos son los mismos en las tres redes”⁶⁵.

La red del primer ciclo: La corriente de cortocircuito del primer ciclo representa el valor más alto de corriente de corto circuito antes de que los decaimientos lleven la corriente de falla a su valor permanente. Se considera que este valor se presenta en un tiempo de $\frac{1}{2}$ ciclo después de que la falla se ha iniciado⁶⁶.

La red de interrupción: La corriente de corto circuito de la red de interrupción es el valor de la corriente en 1.5 al 4 ciclo, esta red se usa para calcular los esfuerzos de interrupción (de apertura de contactos) de los interruptores de circuito de media y alta tensión⁶⁷.

La red de 30 ciclos: se usa para calcular la corriente mínima o de estado permanente, que se requieren para operar los relevadores actuados por sobrecorriente⁶⁸.

⁶⁴ BARRANTES, Jean. Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones en CVG ALUNASA. Trabajo de **grado ingeniero electricista. ciudad universitaria “Rodrigo Facio”**. Universidad de Costa Rica. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería eléctrica, 2014. 117 p.

⁶⁵ Ibid., p. 30.

⁶⁶ Ibid., p. 33.

⁶⁷ Ibid., p. 34.

⁶⁸ Ibid., p. 42.

2.5 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA INCIDENTE

ETAP selecciona automáticamente el método de cálculo de la energía incidente con respecto a las características ingresadas de cada equipo, por lo que en caso del método de la IEEE 1584 y el de la potencia máxima no es necesario calcular manualmente el valor de la corriente de arco; tampoco es necesario determinar el tiempo de duración del arco ya que el programa lo realiza en segundo plano y muestra los resultados para cada escenario.

Una vez seleccionadas las barras falladas, es decir, las barras a las cuales se les va a realizar el cálculo de la energía incidente, se procede a iniciar el estudio en el entorno de cortocircuito en el símbolo resaltado de la Figura 9.

Figura 9. Barra de herramientas cortocircuito ETAP.



Fuente: Autor.

ETAP muestra el resultado de forma gráfica para cada barra y en la página de arc flash del Bus editor para la barra aparece el valor de la corriente de falla, la corriente de arco, el tiempo de duración de la falla, la energía incidente, la distancia de trabajo, la frontera por arco eléctrico y la categoría de los EPP.

ETAP tiene la función de asistente de estudio, el cual se usa para agrupar los diferentes escenarios en un solo estudio, actualizando los reportes para cada escenario, por lo cual, a cualquier modificación que se haga en el sistema, nos ahorra el trabajo de configurar cada escenarios nuevamente y en una sola corrida del estudio, actualiza todos los reportes para poder comparar los resultados en el Arc Flash Report Analyzer Figura 10 para filtrar los resultados y determinar el peor escenario.

Figura 10. Analizador reportes de arco eléctrico.

ID	RAB (m)	PAB (m)	Glove Class	Output Rpt.	Configuration	Total Energy	AFB (m)
Barra Donato 1	0.7	0.2	2	SCGTM_CN	GTM_CN	6.76	5.4
Barra Donato 2	0.7	0.2	2	SCGTM_CN	GTM_CN	8.94	5.5
Barra Donato 34.5	0.8	0.2	4	SCGTM_CN	GTM_CN	71.66	9.4
Borneo TR4	0.8	0.2	4	SCGTM_CN	GTM_CN	10.69	2.7
Donato 115 kV	1	0.8		SCGTM_MLCH	GTM_MLCH	18.98	18.3
S. Auxiliare CA	0.3	0	00	SCGTM_MAI	GTM_MAI	4	1
Secc Salida TR1	0.7	0.2	2	SCGTM_CN	GTM_CN	0.579433	0.3
Secc Salida TR2	0.7	0.2	2	SCGTM_CN	GTM_CN	0.733069	0.4
Secc TR4	0.8	0.2	4	SCGTM_CN	GTM_CN	10.18	2.7

Fuente: Autor.

2.6 DETERMINACIÓN DE FRONTERAS DE APROXIMACIÓN LIMITADA Y RESTRINGIDA

Estas distancias son determinadas de acuerdo a la tensión y del tipo de instalación que se tenga: la Tabla 8 para corriente alterna y la Tabla 9 para sistemas de corriente continua, además se debe tener en cuenta si la parte energizada es móvil como subestaciones abiertas de distribución o fijas como la barra en los trenes de celdas o tableros de distribución.

2.6 ESPECIFICACIÓN DE LA VESTIMENTA PROTECTORA

Cuando la energía incidente es calculada, la NFPA 70E indica que la vestimenta protectora debe ser seleccionada en base al anexo informativo H guía orientativa para la selección de vestimenta protectora y otros equipos de protección personal.

En el anexo D tomado de la Tabla 130.7(C)(14) se encuentra resumida la normatividad que deben cumplir la vestimenta protectora y los equipos de protección, esta Tabla sirve como guía de compra para exigir al fabricante el certificado de cumplimiento de la normatividad.

La ropa resistente al arco viene especificada con un valor de resistencia al arco Figura 11, este valor es atribuido a materiales que describe su desempeño al exponerse a la descarga de un arco eléctrico. El valor de resistencia al arco se expresa en cal/cm^2 y se deriva del

valor de despeño termal al arco (ATPV por sus siglas en inglés) determinado o la energía del umbral de ruptura (EBT) (si un sistema de materiales exhibió una respuesta de ruptura por debajo del valor de ATPV) el valor de resistencia al arco se expresa en ATPV O EBT según cual sea el valor inferior⁶⁹.

ATPV se define en la norma ASTM F 1959-06 como la energía incidente sobre un material o un sistema de múltiples capas de materiales que resulta en una probabilidad del 50 por ciento de que exista una transferencia de calor suficiente a través de la muestra sometida a prueba que provoque el comienzo de una lesión en la piel por quemaduras de segundo grado basándose en la curva de Stoll, cal/cm²⁷⁰.

EBT se define en la norma ASTM F 1956-06 como la energía incidente sobre un material o sistema de materiales que resista en la probabilidad del 50 por ciento de que se produzca la ruptura. La ruptura se define como un agujero común área de 1.5 cm² o una abertura de 2.5 cm en cualquier dimensión⁷¹

Cabe aclarar que solo se considera vestimenta resistente al arco aquella que ha sido sometida a prueba para exposición a un arco eléctrico, la vestimenta resistente a llamas no se considera con valor de resistencia al arco eléctrico.

Figura 11. Vestimenta resistente al arco.



Modificado de: www.javierbotero.com/Javier_Botero/ARCO_ELÉCTRICO.html

⁶⁹ National Fire Protection Association. Op. cit., p. 10.

⁷⁰ Ibid., p. 10.

⁷¹ Ibid., p. 10.

2.7 ELABORACIÓN DE ETIQUETAS

Las etiquetas deben realizarse bajo las especificaciones de la norma ANSI Z535 “SERIES DE ESTANDARES PARA SEÑALES DE SEGURIDAD Y ETIQUETAS” en la cual se especifica colores, tipos de letra y símbolos. En la NFPA 70E se especifica que los equipos eléctricos tales como tableros de distribución, paneles de distribución de controles industriales, envolventes de medidores y centros de control motores que están en unidades que nos son de vivienda, y que probablemente requieran ser examinados, ajustados, reparados o mantenidos mientras están energizados deben ser marcados en campo con un etiqueta que incluya la siguiente información:

1. tensión nominal del sistema
2. Frontera por arco eléctrico
3. al menos una de las siguiente:
 - a. La energía incidente disponible y la distancia de trabajo correspondiente, o la categoría de vestimenta de arco en la Tabla 130.7(C)(15)(A)(b) O LA TABLA 130.7 8C)(15)(B) para el equipo, pero no ambos
 - b. Valor mínimo de la vestimenta resistencia al arco
 - c. Nivel de EPP específico en sitio

En la Figura 12 se muestra el diseño cumpliendo los requisitos anteriormente mencionados.

Figura 12. Etiqueta diseñada según estándar ANSI Z535.



Fuente: Autor.

CAPITULO 3

ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN DONATO

“Millones vieron manzanas caerse, pero Newton se preguntó por qué”

Bernard Baruch

En el capítulo 3 se describe el sistema eléctrico en los niveles de tensión 13.8/34.5/115 kV de la subestación Donato de la Empresa de Energía de Boyacá, partiendo desde el diagrama unifilar, delimitación de la zona de influencia, configuración de topologías, seguidamente se definieron los parámetros técnicos de los equipos como transformadores, generadores y líneas de transmisión necesarios para realizar la actualización y comprobación del modelo del sistema eléctrico de potencia de la empresa de energía de Boyacá, después se realizó la simulación de cortocircuito en la herramienta computacional ETAP en las principales barras del STR. Finalmente con los resultados obtenidos de la simulación se comprobó que las corrientes de cortocircuito del modelo se aproximan a las registradas por los relés de protección en una falla real.

3. ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN DONATO

La subestación Donato, perteneciente al sistema de trasmisión regional STR, ubicada en la ciudad de Tunja, Figura 13, cuenta con una capacidad de transformación nominal de 67,5 MVA distribuidos en tres transformadores trifásicos, compuesta por cuatro barrajes en configuración sencilla, el barraje de 115 kV se compone de tres bahías de línea que reciben dos ternas provenientes de la subestación Paipa y una terna dirigida hacia la subestación Chiquinquirá la cual hace parte de un anillo conformado por las subestaciones Paipa-Donato-Chiquinquirá – Barbosa - Paipa.

Figura 13. Geoposición de la subestación Donato.

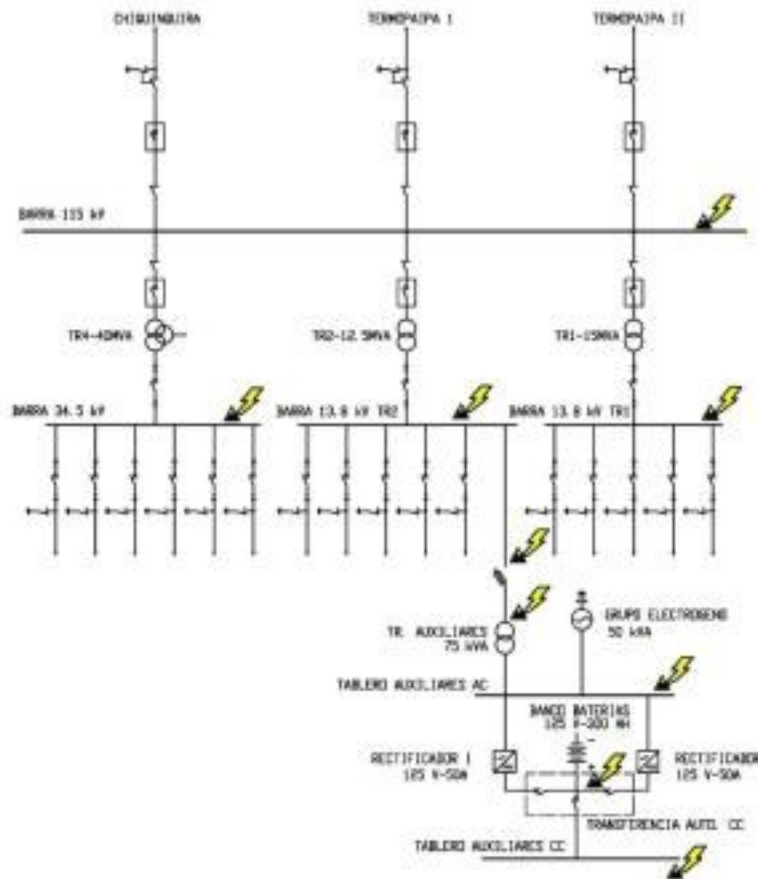


Fuente: Autor.

En la Figura 14 se muestra un diagrama sencillo de la subestación Donato, en esta Figura también se señala las barras a las cuales es necesario realizar el análisis de arco eléctrico en base a la identificación del riesgo para la subestación Donato Anexo E en el cual incluye una descripción detallada de la subestación y un registro fotográfico.

Con la información levantada en campo se construyó el diagrama unifilar completo de la subestación Donato Anexo F en el cual se muestra con más detalle las características de interruptores, transformadores de corriente, transformadores de tensión, dispositivo de medición y dispositivo de protección.

Figura 14. Diagrama unifilar sencillo subestación Donato.



Fuente: Autor.

3.1 AREA DE INFLUENCIA

El área de influencia Figura 15 está delimitada por las subestaciones del Sistema de Transmisión Nacional: Paipa 230 kV, Sochagota 230 kV, Guatiguará 230 kV, Chivor 230 kV y Guavio 230 kV. Respecto al sistema de transmisión regional de la empresa de energía de Boyacá son tenidas en cuenta la zona centro y oriente que en la actualidad no se encuentran interconectadas a nivel de 115 kV, a continuación se describe cada una de ellas:

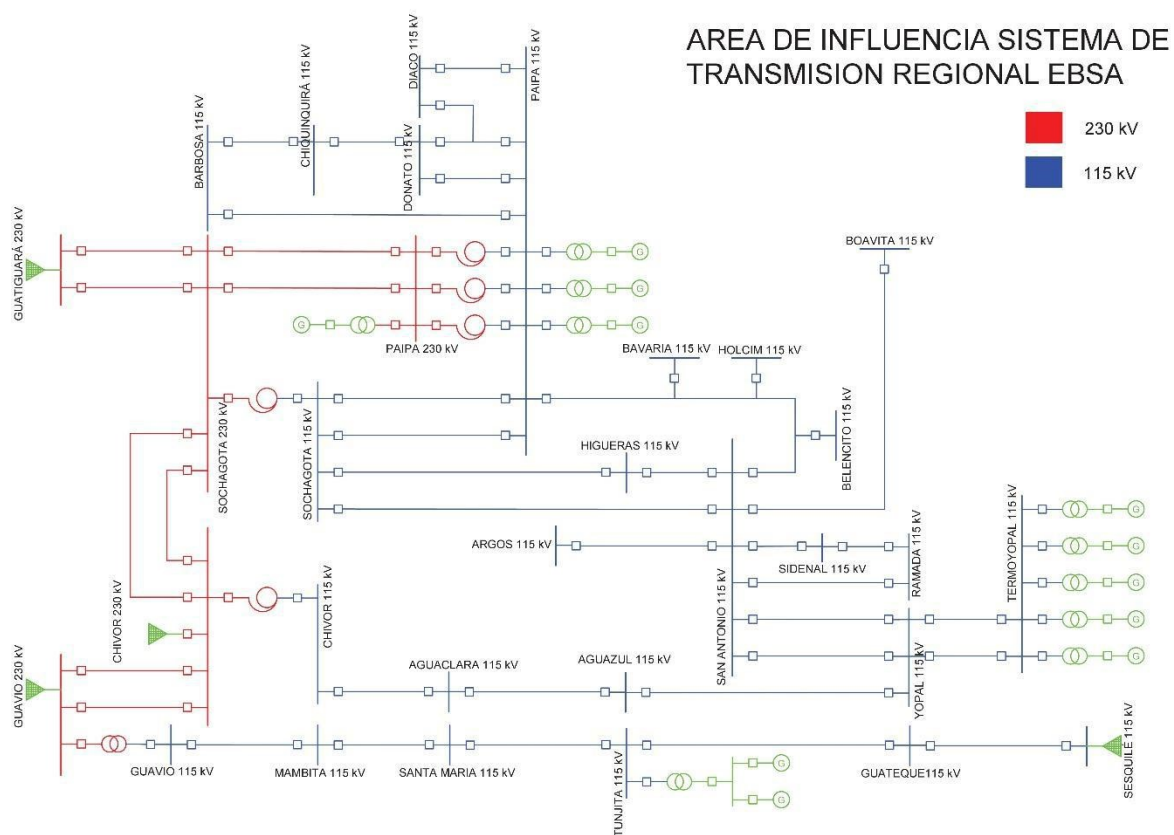
Zona Oriente. Es conectada al STN a través de un transformador de 90 MVA en Guavio que alimenta las subestaciones de Mámbita, Santa María, Guateque y Tunjita permitiendo la interconexión de la PCH Tunjita de 20 MW.

Zona centro. Comprende el área geográfica más grande, contiene las cargas del cinturón industrial: Bavaria, Cementos Argos, Acerías Paz del Río y Sidenal. Está conectada al STN a

través de las subestaciones Paipa y Sochagota, las cuales alimenta las subestaciones Donato, Higuera, San Antonio, Paipa, Sochagota, Ramada, Chiquinquirá, Boavita y Barbosa (Propiedad de ESSA)

El área de influencia también involucra las subestaciones Aguazul 115 kV, Aguaclara 115kV, Yopal 115kV, pertenecientes a ENERCA y las 5 unidades de generación que se encuentran instaladas en la subestación el Morro.

Figura 15. Área de influencia estudio de cortocircuito.



Fuente: Autor.

En el Anexo G se observa en detalle el área de influencia.

3.2 PARÁMETROS TÉCNICOS DE LOS EQUIPOS

3.2.1 Parámetros de Generadores. En el Anexo H, se especifican la información de los generadores en el área de influencia. Esta información es obtenida del estudio de ajuste y coordinación de protecciones de la red eléctrica de potencia de las sub-áreas que involucran los proyectos de ampliación del STR: Subestación Sochagota 115 kV realizado en el año 2016. Del levantamiento de datos para los estudios de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones realizado por la firma GERS S.A. Ingenieros consultores realizado en el año 2011 y de información tomada directamente de las placas características.

3.2.2 Parámetros de Transformadores. Los parámetros de los transformadores Anexo I fueron levantados en campo para las subestaciones pertenecientes a la Empresa de energía de Boyacá. Otra información es solicitada a los respectivos agentes; para cada dato se especifica la fuente de información.

3.2.3 Parámetros de Líneas. Para las líneas del STR a cargo de la Empresa de Energía de Boyacá se tomaron como base 5 tipos de siluetas de estructuras Anexo J , determinadas como las más comunes en el STR de la EBSA las cuales son: horizontales-triangulares y verticales A-B-C; Esta información es suministrada por el Departamento de dibujo. El tipo de conductor es suministrado por el departamento de calidad de servicio de la Empresa de energía de Boyacá, esta información es consultada del PARATEC (*).

Para obtener los parámetros de las líneas se consideran los resultados de la rutina Transmisión Line Editor del software ETAP en base a la información recopilada. Para las líneas del STN y de un operador diferente a la EBSA se consultan de la Tabla 1. Parámetros técnicos líneas del área de influencia proyecto SE Sochagota del informe de IEB, el Anexo K especifica las características técnicas de las líneas de transmisión.

En el Anexo L se especifican los ajustes para las protecciones de sobrecorriente ANSI 50/51/51N/67/67N para los despejes de falla de la subestación Donato, esta información es suministrada por el coordinador de protecciones de la empresa de energía de Boyacá.

(*)PARATEC es un sistema de información de parámetros técnicos de elementos del sector eléctrico Colombiano a cargo de XM, empresa filial de ISA especializada en la gestión de sistemas de tiempo real, encargada de la operación del Sistema Interconectado Nacional SIN a través del Centro Nacional de Despacho CND y de administrar el mercado de energía mayorista MEM, además XM administra las transacciones internacionales de electricidad de corto plazo –TIE- con Ecuador y coordina la operación interconectada con el sistema eléctrico venezolano.

3.3 MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Se consideraron dos escenarios de generación, los cuales son:

- Generación máxima: se considera despachando las cuatro unidades de Termopaipa, las dos unidades de Tunjita y todas las unidades de la central Termoyopal.
- Generación mínima: se considera despachando la unidad tres de Termopaipa, una unidad de Tunjita y ninguna unidad de la central Termoyopal.

Estos dos escenarios se combinan con los mantenimientos de los siguientes elementos:

- Mantenimiento Autotransformador I
- Mantenimiento Autotransformador II
- Mantenimiento Autotransformador III
- Mantenimiento Línea Donato-Chiquinquirá
- Mantenimiento línea Paipa I-Donato
- Mantenimiento línea Paipa II-Donato
- Mantenimiento línea Paipa-Diaco
- Mantenimiento línea Paipa-Sochagota I 115 kV
- Mantenimiento línea Paipa-Sochagota II 115 kV
- Mantenimiento línea Paipa-Sochagota I 230 kV
- Mantenimiento línea Paipa-Sochagota II 230 kV

Con la información recolectada para equipos y modos de operación, se realizó la verificación y actualización del modelo del sistema eléctrico de la EBSA suministrado, en donde se encontró principalmente que las impedancias de cortocircuito de los transformadores de potencia no coincidían ya que en muchos casos se tomó la impedancia en por unidad con la base equivocada, lo cual se corrigió, respecto a líneas se encontró mucha similitud con las siluetas planteadas, en lo que concierne a la parte de protecciones, escenarios de generación y topologías, esta información no se encontraba cargada lo cual fue un aporte al modelo existente.

3.4 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásicas se modelan fallas francas es decir con $Z_f=0$, el cálculo se realiza bajo el estándar ANSI/IEEE tomando voltajes de pre-falla del 1 p.u. que es lo recomendado por la norma⁷³ y se toman en base a la red de interrupción o red del primer ciclo; los resultados para las principales barras de la zona de influencia se

⁷³VASQUEZ, Víctor. Op. cit., p. 81.

muestra en la Tabla 11. Esta información puede ser usada para verificar que el poder de corte de los interruptores sea el adecuado, verificar el estado de saturación de los transformadores de corriente, como referencia para realizar pruebas de medición de tensión de paso y de contacto.

Tabla 11. Corrientes de cortocircuito en las principales barras del área de influencia

SUBESTACIÓN	Generación mínima		Generación máxima	
	3F [kA]	1F[kA]	3F[kA]	1F[kA]
Aguaclara 115 kV	3.27	2.29	3.53	2.45
Aguazul 115 kV	2.45	1.57	3.50	2.45
Bavaria 115 kV	5.97	5.27	7.14	5.94
Boavita 115 kV	1.38	0.90	1.44	0.928
Chiquinquirá 115 kV	2.26	2.22	2.38	1.78
Chivor 115 kV	5.93	6.94	6.21	7.21
Chivor 230 kV	25.67	27.77	26.41	28.37
Donato 115 kV	4.74	3.84	5.32	3.95
Guateque 115 kV	2.69	2.66	2.78	2.25
Guatiguará 230 kV	14.4	13.01	14.68	13.17
Guavio 115 kV	2.9	3.59	2.96	3.65
Guavio 230 kV	17.5	15.84	17.74	15.97
Higueras 115 kV	5.76	5.14	6.79	5.77
La Ramada 115 kV	6.05	5.82	7.58	6.40
Mámbita 115 kV	2.93	3.30	3.00	3.35
Paipa 115 kV	10.84	12.88	14.45	17.1
Paipa 230 kV	7.56	7.86	9.61	9.61
San Antonio 115 kV	6.51	6.26	8.32	7.16
Santa María 115 kV	3.11	3.07	3.32	3.12
Sesquilé 115 kV	11.6	10.12	11.60	10.12
Sochagota 115 kV	10.11	11.14	13.03	13.78
Sochagota 230 kV	7.98	8.18	10.03	9.87
Tunjita 115 kV	3.76	3.93	3.95	4.07
Yopal 115 kV	2.89	1.92	5.83	5.50

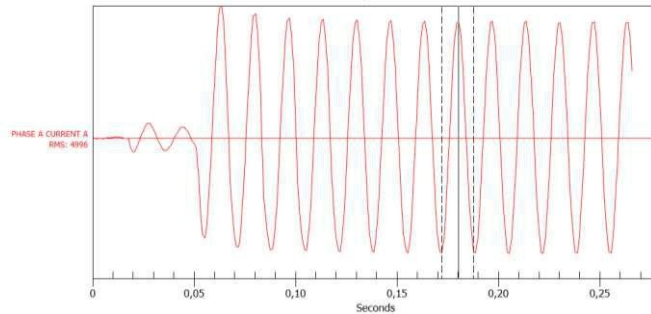
Fuente: Autor.

3.5 COMPROBACIÓN DEL MODELO

Para comprobar el sistema modelado en ETAP, se compara la magnitud de la corriente trifásica calculada en la barra 34.5 kV de la subestación Donato con una perturbografía real

captada por la protección principal de la llegada de la barra 34.5 kV Figura 16, ante una falla trifásica que se presentó en la barra, información suministrada por el coordinador de protecciones de la Empresa de Energía de Boyacá.

Figura 16. Perturbografía falla trifásica en barra 34.5 kV Donado fase A.



Fuente: Coordinador de Protecciones EBSA.

Los resultados para la corriente trifásica de 30 ciclos en la barra Donato 34.5 kV en los dos escenarios de generación comparados con el valor real se muestran en la Tabla 12. Donde se aprecia que los resultados difieren en menos del 6% al valor real.

Tabla 12. Comparación corrientes de falla trifásica barra 34.5 kV subestación Donato.

	Generación máxima [kA]	Generación mínima [kA]	Valor real medido [kA]
Barra 34.5 kV	4.86	4.71	4.99

Fuente: Autor.

De la información descargada del relé Figura 17 se observa que el tiempo de despeje de la falla es de 1.191 segundos, en ETAP la falla es despejada 1220 segundos, lo cual corrobora la exactitud del modelo.

Figura 17. Event Record Relé de sobrecorriente barra 34.5 kV Donato.

02:28:25.974	Pickup: Phase ABC - Phase Time OC 1	4072 Amp	4607 Amp	4265 Amp
02:28:27.075	Trip: Phase ABC - Phase Time OC 1	4961 Amp	4858 Amp	4928 Amp
02:28:27.165	Breaker Opened	5009 Amp	4660 Amp	4930 Amp

Fuente: Coordinador de Protecciones EBSA.

CAPITULO 4

CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE EN LOS BARRAJES DE LA SUBESTACIÓN DONATO

“La humanidad avanza gracias no solo a los potentes empujones de sus grandes hombres, sino también a los modestos impulsos de cada hombre responsable.”

Graham Greene

En el capítulo 4, se valida el modelo que emplea el ETAP para el cálculo de la energía incidente, mediante el cálculo de forma manual empleando la metodología del estándar NFPA 70E, encontrando que los valores son muy similares, luego se procedió a encontrar la energía incidente en todos los puntos bajo análisis, con los valores obtenidos en las simulaciones, se seleccionaron los elementos de protección personal correspondientes al nivel de energía incidente y se finaliza con el etiquetado a los equipos de la subestación.

4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE EN LOS BARRAJES DE LA SUBESTACIÓN DONATO

4.1 EJEMPLO DESARROLLO BARRA 34.5 kV TR4

El tren de celdas de la barra 34.5 kV es del tipo Metal-enclosed Figura 18, alimentada por un transformador 115/34.5 kV de 30 MVA, el aislamiento de la barra es en aire, por el tamaño de la celda se observa que tiene un BIL alto.

Figura 18. Tren de celdas 34.5 kV.



Fuente: Autor.

El valor de energía incidente ante una falla de arco en la barra 34.5 kV se determina por el método de cálculo de Ralph Lee, seleccionado de la Tabla 2 en base a la tensión del sistema; La distancia de trabajo se determinó en campo de 121 cm. La corriente de cortocircuito es determinada por medio de la simulación de una falla trifásica franca en la barra 34.5 kV de la subestación Donato con el estándar ANSI/IEEE tomando como voltaje de pre-falla de 1 p.u. en el escenario de generación máxima en condiciones normales, cuyo resultado es: 4.86 kA.

Figura 19. Esquema dispositivos de protección falla de arco en barra 34.5 kV.



Fuente: Autor.

En la Figura 19 se indica la disposición eléctrica de los dispositivos de protección que deberán operar para despejar la falla en la barra 34.5 kV, los ajustes de los dispositivos de sobrecorriente por fase se muestran en la Tabla 13 y en la Figura 20 se grafican estas curvas, donde se observa que para el valor de falla de 4.86 kA la protección que operaría primero es por el lado de 34.5 kV con un tiempo de 1.14 s y 260 ms después opera la protección por el lado de 115 kV, en el Anexo N esta con más detalle la curva de sobrecorriente. Hay que tener en cuenta que el tiempo de despeje de la falla se compone de la suma entre el tiempo de operación del relé y el tiempo de apertura de los contactos del interruptor, la norma IEEE 1584 establece un tiempo de 0.08 s para un interruptor de media tensión de hasta 35 kV según lo indica la Tabla 14, en total el tiempo total de despeje de la falla es de 1.22 s.

Tabla 13. Ajustes actuales de fase sobrecorriente por 34.5 y 115 kV del TR 4 en subestación Donato.

Dispositivo	RCT	Curva	Pickup [A]		Dial [s]	Instantáneo [A]	
			Prim.	Sec.		Prim.	Sec.
OC TR4 Donato 115	250/5	IEC NI	250	5	0.36	2500	50
OC TR4 Donato 34.5	800/5	IEC NI	800	5	0.30	---	

Fuente: Coordinador Grupo Gestión de Protecciones EBSA.

Tabla 14. Tiempos típicos de operación de dispositivos de interrupción.

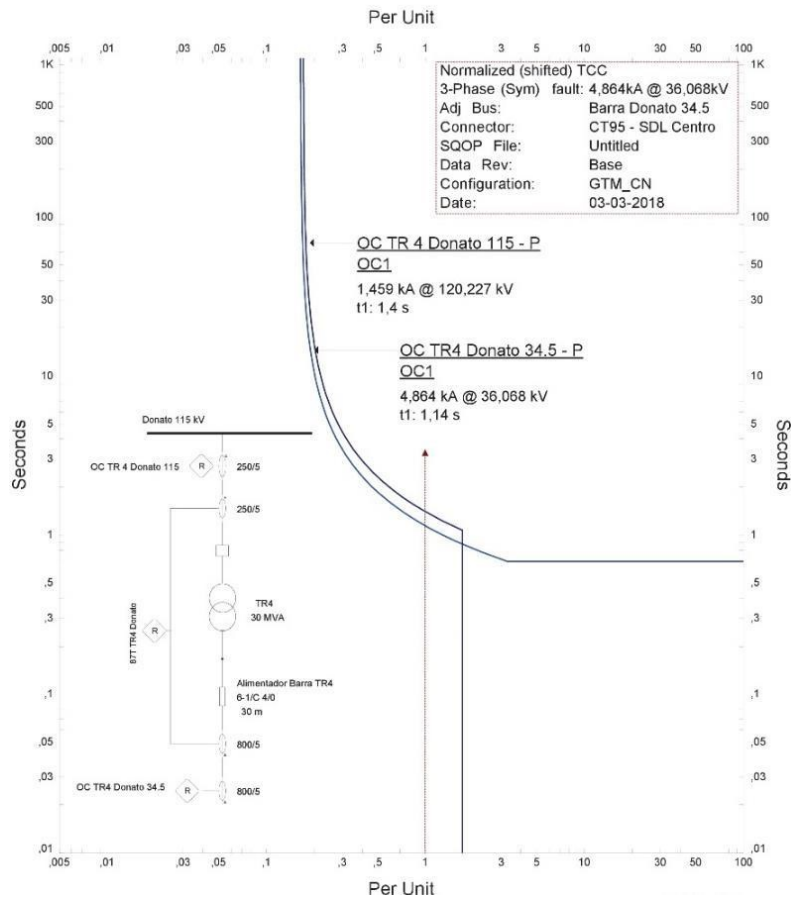
Tipo de interruptor y clasificación.	Tiempo de operación a 60 Hz (Ciclos)	Tiempo de operación (segundos)
Bajo voltaje (Caja moldeada) (<1000 V) (disparo integrado)	1.5	0.025
Bajo voltaje (Caja aislada) (<1000 V) interruptor de potencia (disparo integrado u operado por relé)	3.0	0.050
Media tensión (1-35 kV)	5.0	0.080
Alta tensión (>35 kV)	8.0	0.130

Fuente: Estándar IEEE 1584 2002.

De la ecuación 1.3 la energía incidente estimada es:

$$= 70.69 \quad 2$$

Figura 20. Curva de sobrecorriente ajustada en el relé de entrada a la barra 34.5 kV.



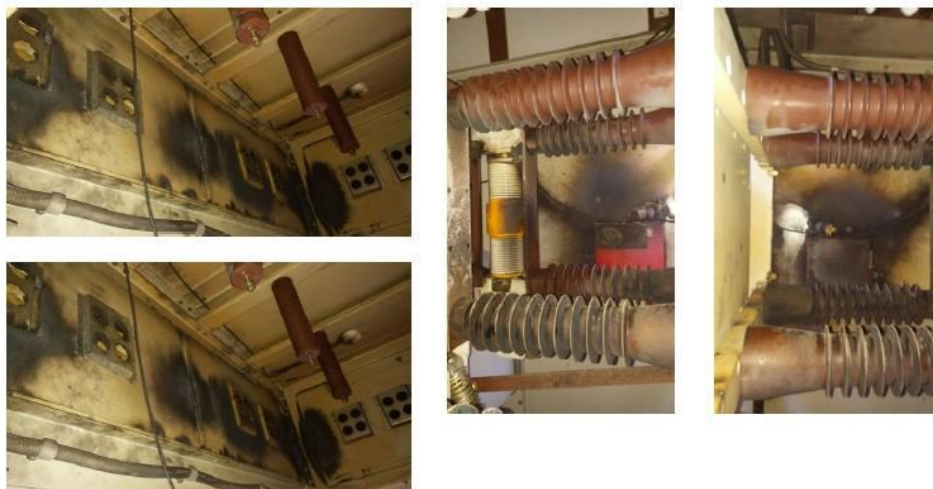
Fuente: Autor.

El nivel de energía incidente en el tren de celdas 34.5 kV corresponde al 176% el valor máximo de energía incidente que soporta el vestuario resistente al arco, categoría de riesgo 4 (40 cal/cm²), un trabajador expuesto a ese nivel de energía tendría consecuencias fatales. Este valor de energía incidente se debe a que el sistema de protección tarda un tiempo de 1.14 s en despejar la falla, un valor demasiado alto para una falla de este tipo, esto a causa de que no se encuentra ajustada la función instantánea, y la falla es despejada por la función temporizada; en la protección de sobrecorriente aguas arriba, es decir por el lado 115 kV como se observa en la Figura 17 aunque tiene ajustada la función instantánea, esta no

arranca debido a que está ajustada para el valor de una falla en bornes de alta tensión del transformador como respaldo a la protección diferencial.

Aunque con esta magnitud de energía incidente puede asociarse con una fuerte explosión **hay que tener en cuenta que “la alta tasa de flujo de calor es la que hace que los productos gaseosos del arco eléctrico se expandan y generen presiones elevadas similares a las reacciones explosivas.** La liberación de calor con rapidez insuficiente no causara una explosión. Por ejemplo, aunque un kilogramo de carbón produce cinco veces más calor que un kilogramo de nitroglicerina, el carbón no puede usarse como un explosivo porque la velocidad a la que se produce este calor es mucho más lenta⁷⁴, de acuerdo a esto, se espera que las consecuencias de la falla no sea destructiva para la infraestructura del tren de celdas sino sea un proceso de calentamiento que puede provocar la falla de algunos equipos pero no en la misma proporción que si fuera una explosión, este efecto se puede evidenciar en la Figura 21 que muestra las consecuencias de una falla en la barra 34.5 kV de la subestación Donato, evento del cual se tomó la información para la comprobación del modelo numeral 3.5, como se observa en las fotografías, se observa quemado las tapas metálicas del tren de celdas, pero no hubo deformación ni desintegración en la estructura, durante este evento se perforaron las botellas de dos interruptores.

Figura 21. Efectos de falla de arco en la barra 34.5 kV de la subestación Donato.



Fuente: Informe técnico INSE GROUP S.A.S.

La frontera de protección contra arco eléctrico es determinada de la ecuación 1.1

⁷⁴ARCAD INC. Evaluation of onset to second degree burn energy in arc flash hazard analysis [online], agosto 2012 [citado 01 marzo 2018]. Disponible desde internet: <www.arcadvisor.com/faq/threshold-incident-energy-second-degree-burn>.

= 9.35

Debido a la estructura civil de donde se encuentran instalado el tren de celdas, no es posible cumplir esta distancia, por lo que cualquier persona que entre al recinto de las celdas está expuesto a sufrir una quemadura mayor a la de segundo grado.

4.2 EJEMPLO DE CALCULO BARRA 13.8 kV TR2

El tren de celdas de la barra 13.8 kV es del tipo Metalclad, alimentada por un transformador 115/13.8 kV de 12.5 MVA, el aislamiento de la barra es en aire. Los interruptores son marca AREVA, el método de extinción del arco es en vacío con un poder de corte asignado en cortocircuito de 25 kA Figura 22.

Figura 22. Tren de celdas 13.8 kV de la subestación Donato.



Fuente: Autor.

El valor de energía incidente ante una falla de arco en la barra 13.8 kV del TR2 se determina por el método de cálculo de la IEEE 1584, los parámetros necesarios para realizar el cálculo son:

Distancia de Trabajo: 91.4 cm (Tabla 6)

Tensión nominal: 13.8 kV

Tipo: Tablero de potencia

GAP: 153 mm (Tabla 4)

X Factor: 0.973 (Tabla 4)

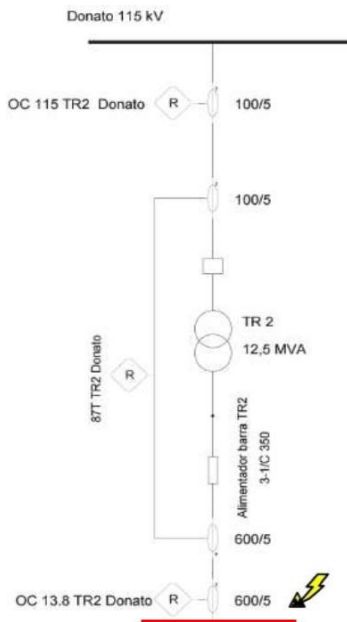
k1=-0.555 Arco en caja

k2=-0.113 Conectado sólidamente a Tierra

Tensión superior a 1 kV

La corriente de cortocircuito es determinada por medio de la simulación de una falla trifásica franca en la barra 13.8 kV del TR2 de la subestación Donato con el estándar ANSI/IEEE tomando como voltaje de pre-falla de 1 p.u. en el escenario de generación máxima en condiciones normales, cuyo resultado es 5.766 kA.

Figura 23. Esquema Dispositivos de protección falla de arco en barra 13.8 kV.



Fuente: Autor.

La corriente de arco es determinada por la ecuación 1.7.

$$= 5.64$$

$$0.85 = 4.80$$

En la Figura 23 se indica la disposición eléctrica de los dispositivos de protección que deberán operar para despejar la falla en la barra 13.8 kV, los ajustes de los dispositivos de sobrecorriente por fase se muestran en la Tabla 15 y en la Figura 24 se grafican estas curvas, donde se observa que para el valor de falla de 5.6 y 4.8 kA la protección por el lado 13.8 kV opera en primer lugar, en un tiempo de 0.916 y 0.987 s respectivamente y entre 280 y 320 ms después opera la protección por el lado de 115 kV, en el Anexo N esta con más detalle la curva de sobrecorriente. Hay que tener en cuenta que el tiempo de despeje de la falla se

compone de la suma entre el tiempo de operación del relé y el tiempo de apertura de los contactos del interruptor, la norma IEEE 1584 establece un tiempo de 0.08 s para un interruptor de media tensión de hasta 35 kV según lo indica la Tabla 14, en total el tiempo total de despeje de la falla para es 0.996 s y es 1.067 s.

Tabla 15. Ajustes actuales de fase sobrecorriente por 13.8 y 115 kV del TR 2 en subestación Donato.

Dispositivo	RCT	Curva	Pickup [A]		Dial [s]	Instantáneo [A]	
			Prim.	Sec.		Prim.	Sec.
OC TR2 Donato 115	100/5	IEC NI	78	3.9	0.38	945	47
OC TR2 Donato 13.8	600/5	IEC NI	600	5	0.30	---	---

Fuente: Coordinador Grupo Gestión de Protecciones EBSA.

La energía incidente normalizado se calcula en base a la ecuación 1.8

Para

$$\text{Para } \dots = 1.7224 \dots$$

La energía incidente es estimada de acuerdo a la ecuación 1.9

Para

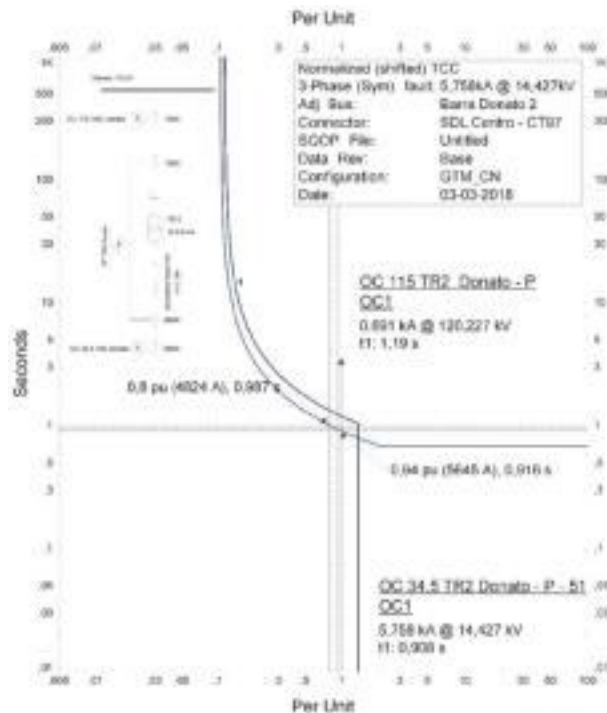
$$\dots = 29.14 \dots = 6.96 \dots = 25.3223 \dots = 6.05 \dots$$

El mayor valor de energía incidente corresponde a la , por lo tanto la energía incidente estimada es:

$$= 6.96 \dots$$

El valor de energía incidente en el tren de celdas 13.8 kV se encuentra dentro de los niveles para el cual se encuentra disponible vestimenta resistente al arco, el nivel de energía no es alarmante teniendo en cuenta el diseño de las celdas ya que son del tipo Metalclad y que la liberación de calor se realiza 0.996 s una rapidez insuficiente para causar una explosión que destruya la celda.

Figura 24. Curva de sobrecorriente ajustada en el relé de entrada de la barra 13.8 kV del TR2.



Fuente: Autor

La frontera de protección contra arco eléctrico es determinada de la ecuación 1.11.

$$= 5596$$

Debido a la estructura civil de donde se encuentran instalado el tren de celdas, no es posible cumplir esta distancia, por lo que cualquier persona que entre al recinto de las celdas está expuesto a sufrir una quemadura mayor a la de segundo grado.

4.3 RESULTADO ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SUBESTACIÓN DONATO

En la Tabla 16 se presentan los valores máximos y mínimos resultado del cálculo de la energía incidente en la subestación Donato para los equipos determinados en el Anexo E en base a la identificación del riesgo. Los cálculos son realizados por medio del software ETAP para los modos de operación descritos en la sección 3.3 el reporte de arco eléctrico generado por ETAP se presenta en el Anexo Ñ.

Tabla 16. Resultados determinación de la energía incidente usando ETAP.

ID	kV (kV)	Distancia de trabajo (cm)	ConFiguración	Energía Total (cal/cm ²)	Frontera de protección de arco (m)	Tiempo de despeje de falla (s)	Corriente de falla trifásica (kA)	Corriente de arco (kA)
Energía Incidente Máxima								
Barra 13.8 kV TR1	13,8	91,4	GTM_CN	6,76	5,4	1,241	4,593	4,517
Barra 13.8 kV TR2	13,8	91,4	GTM_CN	6,94	5,5	0,999	5,766	5,649
Barra 34.5 kV	34,5	121,9	GTM_CN	70,99	9,4	1,224	4,88	4,88
TR Aux. Bornes Alta	13,8	91,4	GTM_CN	0,069	0	0,01	5,766	5,649
Barra115 kV	115	182,9	GTM_MLCH	119,68	18,3	1,353	5,022	5,022
Tablero Auxiliares AC	0,214	45,5	GHM_CN	4,00	0,485		3,459	2,064
Secc. Salida Ctos. TR1	13,8	45,7	GTM_CN	0,58	0,3	0,071	4,5	4,427
Secc. Salida Ctos. TR2	13,8	45,7	GTM_CN	0,73	0,4	0,071	5,614	5,502
Secc. Salida Ctos. TR4	34,5	91,4	GTM_CN	10,15	2,7	0,099	4,837	4,837
TR Aux. Bornes Baja	0,214	91,4	GTM_CN	5,70	2	2	6,584	3,477
Energía Incidente Mínima								
Barra 13.8 kV TR1	13,8	91,4	GHM_MLP1	6,52	5,2	1,287	4,286	4,22
Barra 13.8 kV TR2	13,8	91,4	GHM_MLP1	6,58	5,3	1,034	5,315	5,214
Barra 34.5 kV	34,5	121,9	GHM_MLP1	65,93	9,1	1,34	4,138	4,138
TR Aux. Bornes Alta	13,8	91,4	GHM_MLP1	0,06	0	0,01	5,315	5,214
Barra115 kV	115	182,9	GHM_MLP2	72,35	14,2	1,267	3,242	3,242
Tablero Auxiliares AC	0,214	45,7	GHM_CN	4,00	1		3,459	2,064
Secc. Salida Ctos. TR1	13,8	45,7	GHM_MLP1	0,54	0,3	0,080	4,203	4,14
Secc. Salida Ctos. TR2	13,8	45,7	GHM_MLP1	0,67	0,3	0,080	5,184	5,088
Secc. Salida Ctos. TR4	34,5	91,4	GHM_MLP1	8,62	2,5	0,080	4,106	4,106
TR Aux. Bornes Baja	0,214	91,4	GHM_MLP1	5,69	2	2	6,574	3,473
Energía Incidente en CC								
Tablero Auxiliares CC	125	45,7	GTM_CN	4	0,9	0,016	2,829	1,414
Transferencia Auto. CC	125	45,7	GTM_CN	4	0,9	0,016	2,829	1,414

Fuente: Autor.

Como se observa en la Tabla anterior los resultados del software ETAP para la barra 13.8 kV del TR2 y barra 34.5 kV del TR4 obtenidos difieren en el 1% con respecto a los valores calculados manualmente en la sección 4.1 y 4.2 usando dos métodos diferentes, por consiguiente se valida el uso del software ETAP para determinar el método y cálculo de la energía incidente.

Se resalta que los valores máximos de energía incidente a todos los elementos bajo análisis a excepción de la barra 115 kV ocurre en el escenario de generación máxima en condiciones normales, así mismo con respecto a los valores mínimos, estos no son tan significativamente diferentes a los valores máximos, y que estos se presentan en el escenario de generación mínima mientras se encuentra por fuera la línea Paipa-Donato I.

En las barras 13.8/34.5/115 kV se observan tiempos de despeje de falla mayores o iguales a un segundo, la razón de esto es que las fallas son despejadas por la función temporizada de los relés de protección de sobrecorriente, mientras que en los seccionamientos de salidas de los circuitos los tiempos no superan los 100 ms ya que todas las salidas de los circuitos tienen ajustada la función de sobrecorriente instantánea.

4.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE ELECTROCUCIÓN

De acuerdo a la sección 1.5.1 las fronteras de aproximación limitada y restringida para los equipos de la subestación Donato son presentadas en la Tabla 17.

Tabla 17. Evaluación del riesgo de electrocución en equipos de la subestación Donato.

ID	Tensión nominal del sistema (fase – fase)	Frontera de aproximación Limitada [m]	Frontera de aproximación Restringida [m]	Categoría de guantes dieléctricos
Trenes de celdas barra 13.8 kV	13.8	1.5	0.7	Clase 2
Celda de Seccionamiento y transformador de auxiliares	13.8	1.5	0.7	Clase 2
Tren de Celdas 34.5	34.5	1.8	0.8	Clase 4
Campo 115 kV	115	2.5	1.0	No disponible
Tablero auxiliares corriente alterna	0.220	1.0	Evitar contacto	Clase 00
Tablero auxiliares corriente continua, cargadores y transferencia.	0.125	1.0	Evitar contacto	Clase 00

Fuente: Autor.

4.5 SELECCIÓN DE LOS EPP RESISTENTES AL ARCO

A continuación se va a seleccionar la vestimenta resistente al arco en base a los resultados de la determinación de la energía incidente de la sección 4.3.

4.5.1 Trenes de celdas barras 13.8 kV. Los resultados del cálculo de la energía incidente para la barra 1 y 2 en el nivel 13.8 kV es 6.76 y 6.94 cal/cm² respectivamente para lo cual en base al Anexo A los elementos de protección requeridos se especifican en la Tabla 18.

Tabla 18. Especificación de la vestimenta protectora resistente al arco y EPP para trabajo en los trenes de celdas de las barras 13.8 kV.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Vestimenta resistente al arco con un valor mínimo de 12 cal/cm ²	-Camisa mangas largas y pantalón u overol resistente al arco. -Protector facial y balaclava resistente al arco.
Equipo de protección personal	-Casco. -Guantes de cuero. -Protección auditiva. -Gafas de seguridad. -Calzado de trabajo de cuero.

Fuente: Autor.

En la Figura 25 se muestra el equipo resistente al arco descrito en la Tabla 18.

Figura 25. Vestimenta resistente al arco determinados para las barras 13.8 kV.



Fuente: Trajes y accesorios de protección contra el arco eléctrico SIBILLE SAFE ®.

4.5.2 Tren de celdas 34.5 kV y Campo 115 kV. Para el tren de celas de 34.5 kV la energía incidente es de 70.99 cal/cm² y en el campo de 115 kV es de 119.86 cal/cm², la NFPA 70E recomienda no trabajar cuando el nivel de energía incidente supera los 40 cal/cm², aunque existen EPP de hasta 100 cal/cm², los riesgos derivados del arco eléctrico como la onda de

presión, pueden desprender objetos que son lanzados como proyectiles que los EPP no están diseñados para soportar.

4.5.3 Celda de seccionamiento y de transformador de auxiliares. En la celda de protección del transformador de auxiliares existen dos niveles diferentes de energía, en la Figura 26 se aprecia demarcada la zona 1 donde la energía incidente es igual al valor de la Barra 13.8 kV TR2 de 6.94 cal/cm^2 y la zona 2 en los bornes de alta tensión del transformador de servicios auxiliares de 0.069 cal/cm^2 .

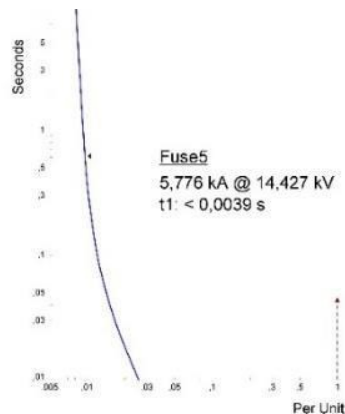
Figura 26. Celda de seccionamiento transformador de auxiliares.



Fuente: Autor.

La energía incidente de la zona 2 disminuye drásticamente debido a la rápida actuación de los fusibles, en la Figura 27 se especifica la curva del fusible que a la corriente de falla este dispara en 39 ms. Se toma como referencia el valor de energía de la zona 1 de 6.9 cal/cm^2 .

Figura 27. Curva de fusible celda de seccionamiento.



Fuente: Autor.

En la celda del transformador de auxiliares se van a presentar dos energías incidentes diferentes, en la primera es en los bornes del transformador por alta tensión con un valor de 0.069 cal/cm^2 y en la segunda en los bornes por baja tensión con un valor de 5.7 cal/cm^2 ; para la determinación de este segundo valor se tomó como tiempo de despeje de la falla 2 segundos, en base a la recomendación de la IEEE 1584 en la que menciona que cuando el tiempo de despeje de la falla es superior, es recomendable tomar 2 segundos ya que es el tiempo probable que una persona reaccione y se aleje donde sea físicamente posible, ya que según la curva del fusible Figura 23 para la corriente de arco de 3.47 kA, el devanado primario conduciría 52.4 A por lo que el fusible operaría en 5.48 s.

Los EPP requeridos para estas celdas son los mismos que los especificados para las celdas barras 13.8 kV Tabla 18.

4.5.4 Tablero auxiliares AC. La selección de la vestimenta resistente al arco y EPP en el tablero de servicios auxiliares de corriente alterna se realiza mediante el método de la categorización del riesgo, debido a que la IEEE 1584 recomienda ignorar paneles de distribución con tensiones menores o iguales a 208 V si el transformador que la alimenta es inferior a 125 kVA, pero la práctica ha demostrado que en estos niveles de tensión también se producen fallas de arco.

Por medio de ETAP se puede determinar que la corriente máxima de cortocircuito trifásico en los servicios auxiliares AC es de 3.4 kA y el tiempo de despeje de la falla va hacer menor de 16 ms, de la Tabla 19 se especifica la categoría de los EPP de arco eléctrico requeridos y en la Tabla 20 la especificación de dichos elementos.

Tabla 19. Categorización de los EPP de arco en base a las características del sistema AC.

EQUIPO	CATEGORÍA EPP DE ARCO ELÉCTRICO	FRONTERA DE ARCO ELÉCTRICO (mm)
Paneles de distribución u otros equipos con tensión nominal de 240 V y menor Parámetros: Máxima corriente de cortocircuito disponible 25kA; máximo 0.03 s (2 ciclos) de tiempo de despeje de falla. Distancia de trabajo: 45.5 mm	1	485

Fuente: NFPA 70E 2015.

Tabla 20. Especificación vestimenta resistente al arco y EPP Categoría 1.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Vestimenta resistente al arco con un valor mínimo de 4 cal/cm ²	-Camisa mangas largas y pantalón u overol resistente al arco. -Protector facial resistente al arco. -Casco
Equipo de protección personal	-Guantes de cuero -Protección auditiva -Gafas de seguridad -Calzado de trabajo de cuero

Fuente: NFPA 70E 2015.

En la Figura 28 se muestra el equipo resistente al arco descrito en la Tabla 20.

Figura 28. Vestimenta resistente al arco y EPP determinados para trabajo en los servicios auxiliares de la subestación Donato.



Fuente: Trajes y accesorios de protección contra el arco eléctrico SIBILLE SAFE®.

4.5.5 Tablero auxiliares CC, cargadores y transferencia. La energía calculada es de 0.04 cal/cm², para dar un resultado más conservador se seleccionó la vestimenta resistente al arco y los EPP de acuerdo a la categorización del riesgo con los parámetros calculados de corriente de arco de 1.4 kA y un tiempo de despeje de falla 16 ms en la Tabla 21 se especifica la categoría de los EPP de arco eléctrico.

Tabla 21. Categorización de los EPP de arco en base a las características del sistema CC.

EQUIPO	CATEGORÍA EPP DE ARCO ELÉCTRICO	FRONTERA DE ARCO ELÉCTRICO
Baterías de almacenamiento, tableros de distribución de corriente continua y otras fuentes de suministro 100>Voltaje<250 Máxima duración del arco: 2s y distancia de trabajo de 455 mm Corriente de cortocircuito < 4 kA	1	90 mm

Fuente: NFPA 70E 2015.

Los EPP requeridos para estas celdas son los mismos que los especificados para el tablero de auxiliares de AC e en la Tabla 20.

4.6 ETIQUETADO DE LA SUBESTACIÓN

En el Anexo M están las etiquetas obtenidas como resultado, las cuales fueron generadas de la Tabla de resultados exportada del ETAP y usando la función de correspondencia cruzada de Word para generarlas.

CAPITULO 5

MITIGACIÓN DEL RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

“Todos somos genios. Pero si juzgas a un pez por su capacidad de trepar árboles, vivirá toda su vida pensando que es inútil”

Albert Einstein

En el capítulo 5, explicación el principio de funcionamiento de algunos métodos de mitigación del riesgo de arco eléctrico desde el punto de vista técnico.

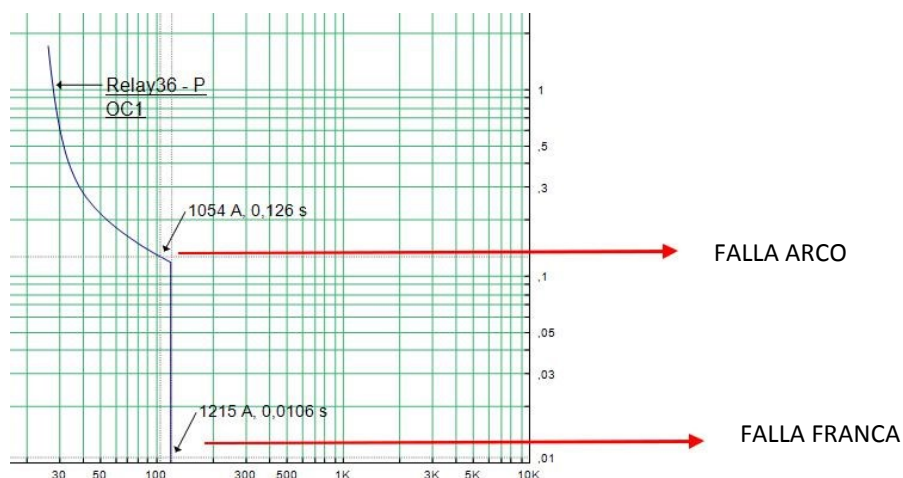
5. MITIGACIÓN DEL RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

La vestimenta protectora de arco eléctrico y el equipo de protección personal es la última barrera de defensa que tiene el trabajador al verse expuesto a una falla por arco, por lo que no es la mejor manera de mitigar el riesgo, es por ello que se deben tomar acciones desde el punto de vista técnico. Como se explicó en el numeral 1.3 el valor de energía incidente depende básicamente de la tensión del sistema, la corriente de cortocircuito, la duración del arco y la distancia de trabajo, como la tensión del sistema y la corriente de cortocircuito son variables implícitas del sistema que no son viablemente modificables, se ha trabajado en alternativas para disminuir la duración del arco y aumentar la distancia de trabajo, algunos de los métodos empleados se explican a continuación.

5.1 DISMINUIR LA DURACIÓN DEL ARCO

5.1.1 Modificar ajustes de sobrecorriente. Cuando se realiza un estudio de coordinación de protecciones, la función de tiempo definido para la fase se realiza en base al valor mínimo de falla trifásica franca, por lo que para una corriente menor en el caso de una corriente de arco podría ocurrir que el relé opere por el ajuste temporizado, lo cual conlleva a un tiempo de operación mucho mayor, en la Figura 29 el valor instantáneo está ajustado para 1200 A, con una corriente de 1215 A el relé operaría en 0.01 s mientras que para una corriente de 1054 A tardaría en operar 0.126 s, por esta razón se ve reflejado en un aumento significativo de la energía incidente. Por lo que en base a un estudio de arco eléctrico se puede sugerir según sea conveniente cambio en los ajustes para que opere el relé ante una falla por arco con el ajuste de instantáneo.

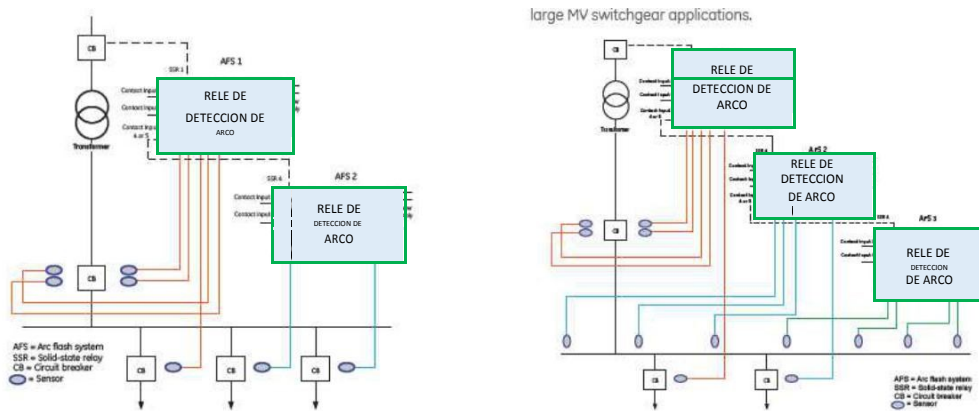
Figura 29. Comparación falla trifásica franca y falla de arco en curva de sobrecorriente.



Fuente: Autor.

5.1.2 Sistema de detección de arco eléctrico. Comercialmente ya se encuentran relés específicamente diseñados para detectar el arco y enviar el disparo al interruptor en un tiempo muy corto manteniendo la coordinación y reduciendo la energía incidente al mismo tiempo, estos relés funcionan midiendo dos variables: la luz y la presión dentro de un tren de celdas con la ubicación estratégica de múltiples sensores (Figura 30).

Figura 30. Esquema de aplicación sistema detección de arco eléctrico.



Modificado de: Multilin A60 Advanced light and pressure arc flash detection system.

Una ventaja importante de este sistema es que se puede llevar la señal de operación al centro de control es que esta advierte al operador del tipo de falla en caso de presentarse, evitando la re-energización de la falla y de esta manera salvaguardando a las personas que puedan estar presentes en la subestación y el estado de los equipos, por lo que se reduce el estrés a los equipo durante una falla como se puede ver en la Figura 31, para el mismo tipo de falla 480 V, 60 kA, 60 Hz al lado izquierdo la falla se despejo en 4 ciclos, mientras que al lado derecho se despejo en menos de un ciclo reduciendo la energía se reduce el daño y el equipo se puede poner en servicio más rápido y más seguro.

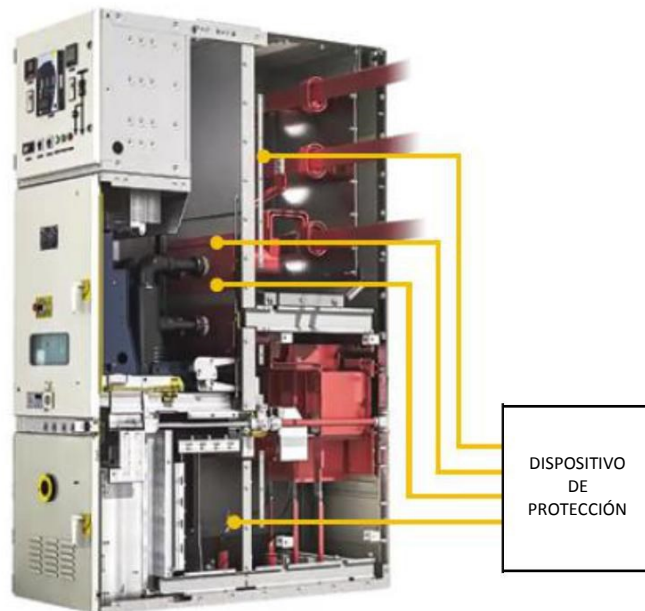
Figura 31. Comparación de consecuencias en equipos ante una falla de arco eléctrico despejada en diferentes tiempos.



Fuente: Mitigación del riesgo en MT General Electric.

5.1.3 Relés con función de detección de arco eléctrico. En el mercado ya se encuentran disponibles relés que entre sus funciones incorporan la detección de arco eléctrico, esto lo logran censando la luz dentro de la celda y la corriente en el sistema Figura 32, al igual que el sistema de detección de arco eléctrico se puede llevar la señal al centro de control, se mantiene la coordinación y se reduce el daño en los equipos.

Figura 32. Relés que incorporan la detección de arco eléctrico.

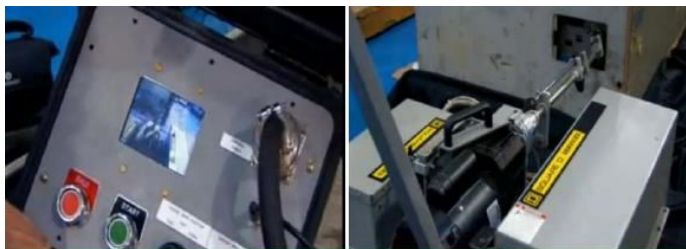


Modificado de: Multilin 850 Innovative feeder, Bay controller/one box solution for industrial and utility applications.

5.2 AUMENTAR DISTANCIA DE TRABAJO

En el mercado también existen mandos operados remotamente Figura 33, y equipos para extraer o introducir interruptores en celdas tipo metal enclosed Figura 34, que tienen como principio aumentar la distancia entre la fuente potencial de arco y el trabajador, permitiendo que la persona realice sus tareas fuera de la frontera por arco eléctrico, evitándole el uso de la vestimenta resistente al arco, o utilizar una de menor categoría.

Figura 33. Mando operado remotamente para maniobra de interruptores.



Fuente: Mitigación de arco eléctrico Schneider Electric.

Figura 34. Equipo extraer remotamente interruptores.



Fuente: inoRAC Remote Racking Device Overview.

5.3 VENTANAS INFRARROJAS

Las ventanas infrarrojas hacen posible inspecciones con mayor seguridad del equipo eléctrico energizado, ya que normalmente un termografista debe abrir las puertas de gabinetes o quitar tapas para poder acceder a la parte energizada, esto es muy peligroso porque se cambia el ambiente dentro del gabinete y el polvo, la humedad o algo pueden entrar en contacto con los componentes eléctricos provocando un arco eléctrico. Una ventana infrarroja es un dispositivo instalado en la superficie del gabinete que le permite medir a una cámara infrarroja a través de un material IR transmisor la temperatura de los componentes eléctricos energizados dentro del gabinete sin que tengan la necesidad de exponerse a la parte energizada Figura 35⁷⁵.

⁷⁵Transequipos. Dispositivos de seguridad para el mantenimiento eléctrico: ventanas o mirillas infrarrojas IR [online], Septiembre 2016 [citado 20 enero de 2017]. Disponible desde internet: < <https://lanotaenergetica.com/tag/termografia/> >

Figura 35. Termografía a través de ventanas infrarrojas.

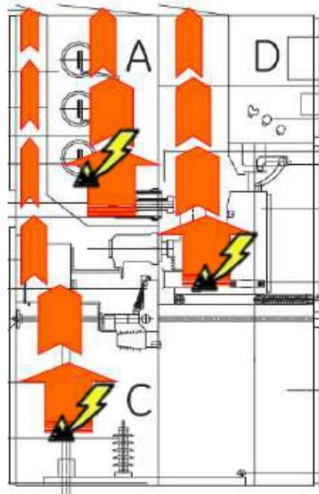


Fuente: Transequipos S.A

5.4 CELDAS RESISTENTES AL ARCO ELÉCTRICO

Las celdas resistentes al arco permiten un camino de desfogue de la energía incidente (Figura 36) disminuyendo el riesgo para las personas que se encuentren alrededor aun si el gabinete de control está abierto, esto lo consigue con una tapas que debido al aumento de presión se levantan permitido liberar la energía de forma segura. La norma que establece la categoría de resistente al arco es la IEEE C37.20.7.

Figura 36. Funcionamiento celda resistente al arco eléctrico.



Modificado de: Mitigación del riesgo en MT General Electric.

CONCLUSIONES

La simulación de arco eléctrico en la subestación Donato, permitió encontrar que el valor máximo de energía incidente está en la barra de 115 kV, superando las 100 cal/cm^2 razón por la cual se prohíbe el trabajo mientras el equipo se encuentre energizado, estos valores particularmente elevados se deben al esquema que ha adoptado la EBSA de no considerar una protección de barra, esto lleva a que otros dispositivos de protección actúen en tiempos prolongados, por esto se sugieren acciones correctivas para disminuir el tiempo de despeje de las fallas por arco como la implementación de protecciones diferenciales de barra.

Mediante la simulación se encontró que el tiempo de despeje de una falla interna en los trenes de celdas de 13.8/34.5 kV, es aproximadamente un segundo, un valor muy alto para ser una falla prácticamente franca, en consecuencia se liberan grandes cantidades de energía térmica por la exposición al arco, con la implementación de relés de detección de arco eléctrico, se obtienen tiempo de despeje de falla de alrededor de los 100 ms incluyendo el tiempo de apertura del interruptor, así pues, se está mitigando el riesgo para las personas y el estrés que genera la falla en los equipos, lo que beneficia directamente a la calidad del servicio que presta la EBSA, ya que si se disminuye la energía incidente también se reduce el daño y el equipo se puede poner en servicio más rápido y más seguro.

Los resultados de energía incidente obtenidos para los sistemas de servicios auxiliares se podrían utilizar en otras subestaciones de la empresa de energía de Boyacá, ya que en las visitas realizadas a varias subestaciones se evidenció que el dimensionamiento en cuanto a banco de baterías y transformador de servicios auxiliares en la mayoría de los casos es el mismo y equipos como cargadores de baterías y transferencias automáticas son semejantes a los empleados en Donato, exceptuando a las últimas subestación construidas en las cuales se usa equipo de tecnología más moderna en lo que respecta a cargadores de baterías y transferencias automáticas pero que no afectan el cálculo de energía incidente.

Los resultados de energía incidente en los seccionadores de salida de los circuitos en el nivel de tensión de 13.8 kV obtenidos de la simulación dan como resultado una energía menor a 1.2 cal/cm^2 lo que permite establecer que en el perímetro adyacente a la subestación el riesgo a sufrir una lesión causada por un arco eléctrico es mínimo, es decir que en lo que concierne a riesgos eléctricos el contacto directo es el más relevante.

Los resultados del modelo de cortocircuito en ETAP, se acercan a los valores reales medidos por los relés de protección, lo cual permite validar las simulaciones y respalda el trabajo realizado durante la pasantía, por lo que además de realizar el análisis de arco eléctrico, el modelo fue usado para determinar ajustes de coordinación de protecciones, localizar fallas, determinar el estado de saturación de transformadores de corriente, los resultados

también sirvieron de referencia para pruebas en la subestación de tensión de paso y contacto.

Se produce la liberación máxima de energía incidente en los equipos bajo análisis a excepción de la barra de 115 kV cuando la configuración del sistema se encuentra en su topología normal, además, la variación con respecto al valor mínimo de energía incidente en estos equipos no es significativo, con lo cual el valor de energía incidente prácticamente que va a permanecer constante en todos los escenarios de generación y topologías del sistema.

RECOMENDACIONES

Se resalta la importancia de emplear herramientas computacionales como el software ETAP, por ser en general fácil de utilizar, además de la característica de ofrecer un entorno sencillo, pero completo del sistema y que ofrece una extensa biblioteca de dispositivos de protección y gran variedad de herramientas que permiten analizar con mayor exactitud las curvas de coordinación de protecciones en comparación de otras herramientas como Excel.

Se recomienda realizar los cálculos de energía incidente y distancia de arco eléctrico de forma manual para posteriormente validar los resultados mediante software, ya que esto permite entender las limitaciones, los fundamentos, los parámetros de entrada y de salida de cada uno de los diferentes métodos aplicados, de modo que esta comprensión influye en tomar decisiones con una mayor certeza profesional a la hora de levantar información en campo y de modelar la red.

Se sugiere destinar un tiempo prudente para el levantamiento los parámetros técnicos de equipos ya en el desarrollo de este trabajo fue la tarea que más requirió tiempo.

Posterior a este trabajo para la EBSA se recomienda:

Las instalaciones locativas de la subestación Donato se encuentra limitada con muros la distancia frontal y posterior de los trenes de celda de 13.8/34.5 kV con respecto a la distancia de protección de arco que se debe tener, por lo que se recomienda informar a las personas antes de iniciar alguna tarea en la subestación para que tomen las medidas de prevención adecuadas.

Para los nuevos proyectos sea criterio para la selección de los trenes de celdas exigir el certificado de cumplimiento de la norma la IEEE C37.20.7. Guía IEEE para pruebas de equipos de distribución metal-enclosed de hasta 38 kV para fallas de arco interno, para mitigar el riesgo de arco eléctrico.

En procesos de modernización de relés de protección se recomienda utilizar relés con la función de detección de arco interno para evitar la utilización de sistemas de detección de arco en discreto, principalmente por las limitaciones de espacio que se tienen en los tableros actualmente y porque se ahorra en todo lo que implica realizar el montaje de un nuevo equipo como lo son: circuito de alimentación, circuito de disparo, comunicaciones, etc.

En un sistema eléctrico como el de la Empresa de energía de Boyacá se debe implementar políticas de seguridad para minimizar el riesgo de arco eléctrico en cooperación con diferentes departamentos de la empresa como: Mantenimiento, Gestión social, Expansión

del sistema, gerencia y los mismos electricistas para poder hacer efectivos los resultados de la evaluación del riesgo de arco eléctrico.

Siempre que sea posible debe evitarse el trabajo energizado, ya que la manera más segura de trabajo para la personas siempre va a ser el trabajo sin tensión o en frío.