

Estudio de Flameo por Arco Eléctrico en el Sistema SDL de ESSA

Daniel Eduardo Alarcón Morales

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Sistemas de
Distribución de Energía Eléctrica

Director

Hermann Raúl Vargas Torres

Doctor Ingeniero Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Antecedentes	13
1.2 Estructura del Documento.....	13
2. Conceptos para el Estudio de Arco Eléctrico	15
2.1 Glosario de Términos.....	15
2.1.1 Análisis del Riesgo de Arco.....	15
2.1.2 Corriente de Falla.....	15
2.1.3 Corriente de Falla de Arco	15
2.1.4 Corriente de Falla Disponible	16
2.1.5 Corriente de Falla Franca.....	16
2.1.6 Descarga Eléctrica	16
2.1.7 Distancia de Trabajo	16
2.1.8 Energía Incidente	17
2.1.9 Energizado	17
2.1.10 Expuesto (Partes Vivas).....	17
2.1.11 Frontera de Protección de Arco	18

2.1.12 Frontera de Aproximación Limitada.....	18
2.1.13 Frontera de Aproximación Restringida.....	18
2.1.14 Peligro de Arco Eléctrico.....	19
2.1.15 Riesgo de Descarga.....	19
2.1.16 Riesgo Eléctrico	19
2.2 El Fenómeno Denominado Arco Eléctrico	20
2.2.1 Definición de Arco Eléctrico	20
2.2.2 Como se produce el Arco Eléctrico	21
2.2.3 Peligros asociados con el Arco Eléctrico.....	21
2.2.4 Consecuencias de un accidente por Arco Eléctrico	22
2.3 Marco Regulatorio	23
2.3.1 Retie 2013	23
2.3.2 Resolución 5018 de 2019.....	24
2.3.3 Norma NTC 2050 – Segunda actualización. (NFPA-70-2020) (NEC-2020).....	25
2.3.4 ISO 45001-2018.....	25
2.3.5 NFPA-70E – 2015.....	26
2.3.6 IEEE-1584: Guía para calcular los riesgos por Arco Eléctrico.	29
3. Metodología Aplicada para la Evaluación del Riesgo por Arco Eléctrico	30
3.1 Descripción del Método de Cálculo.....	30
3.1.1 Cálculo de la corriente de Arco	31
3.1.2 Cálculo de la Energía Incidente	33
3.1.3 El método de Ralph Lee.....	35

3.1.4 Cálculo de La Frontera de Protección de Arco	35
3.2 Reconocimiento del Riesgo	36
3.3 Evaluación del Riesgo.....	37
3.4 Definición	38
3.5 Análisis	39
3.5.1 Identificar todos los sitios y equipos.....	39
3.5.2 Recolección de información de campo	39
3.5.3 Desarrollar diagramas unifilares precisos	40
3.5.4 Realizar los cálculos de cortocircuito	41
3.5.5 Realizar una apropiada coordinación de protecciones	42
3.5.6 Determinar la corriente de Arco Eléctrico	42
3.5.7 Determinar el Tiempo de Extinción del Arco Eléctrico	43
3.5.8 Calcular la Energía Incidente.....	44
3.5.9 Determinar El Límite de Aproximación de Arco	44
3.5.10 Documentar los resultados	45
3.5.11 Elaborar los rótulos	46
3.6 Rotulado.....	46
3.7 Elementos de Protección Personal (EPP)	47
3.8 Permisos de Trabajo.....	47
3.9 Programas de Seguridad	47
3.10 Entrenamiento	48
3.11 Mantenimiento del Sistema.....	48

4. Implementación de esta Metodología en el Sistema SDL de ESSA.....	50
4.1 Identificación de todos los sitios y equipos	50
4.2 Recolección de información de campo	50
4.3 Desarrollo de Diagramas Unifilares.....	51
4.4 Estudio de Corto – Circuito	52
4.5 Estudio de Coordinación de Protecciones.....	57
4.6 Estudio de Arco Eléctrico	62
4.6.1 Descripción de los resultados.....	65
4.6.2 Elaboración del Rotulado.....	72
5. Conclusiones	75
Referencias Bibliográficas	78

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Métodos de Cálculo de energía Incidente.....	29
Tabla 2. Umbrales de utilización norma IEEE – 1584	31
Tabla 3. Factor de distancia x utilizado en 5.3 como exponente.	34
Tabla 4. Incremento de la Icc con la entrada de proyectos de expansión en ESSA	52
Tabla 5. Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Sur Caso Base vs Des-Anillado .	53
Tabla 6. Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Palenque, Caso Base vs Des-Anillado	54
Tabla 7. Resultados Cálculo de Cortocircuito Trifásico.....	57
Tabla 8. Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur.....	63
Tabla 9. Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur.....	63
Tabla 10. Cambio de la Energía Incidente con la distancia barra SUR-T1-CKTOS.....	66
Tabla 11. Nivel Ignífugo de los Elementos de Protección Personal.....	67
Tabla 12. Cambio de la Energía Incidente con la distancia barra SUR.T1.138	70

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Límites de Aproximación.....	27
Figura 2. Flujograma de actividades para la evaluación de Riesgo por Arco Eléctrico.	49
Figura 3. Análisis de Coordinación de Protecciones para el Transformador T-7, Subestación Palenque.....	61
Figura 4. Celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur.....	64
Figura 5. Resultados de Análisis de Arco en los Diagramas Unifilares	65
Figura 6. Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas al transformador T1 de la Subestación Sur.....	69
Figura 7. Rotulado de Arco Eléctrico en la barra SUR-T1-CKTOS	75

Lista de Apéndices

“Ver Apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS”

Apéndice A. Anexos de Datos

Apéndice B. Anexos de Resultados

Resumen

Título: Estudio de Flameo por Arco Eléctrico en el Sistema SDL de ESSA*

Autor: Daniel Eduardo Alarcón Morales**

Palabras Clave: Arco eléctrico, corriente de falla, corriente de arco, energía incidente, IEEE 1584, NFPA 70E, evaluación del riesgo.

Descripción:

Desde el punto de vista de un operador de red o agente distribuidor de energía y ante una situación anómala e imprevista en su sistema eléctrico de distribución que conduzca a la interrupción del suministro de energía, se requiere la más rápida revisión e identificación de los elementos fallados con el fin de restablecer el servicio eléctrico a los clientes afectados. Ante estas fallas, la revisión de las subestaciones de distribución se ejecuta, en algunas ocasiones con elementos aún energizados, siendo aquí donde deben tomarse todas las precauciones para proteger al recurso humano y los costosos equipos. El riesgo más evidente es la posible explosión por arco eléctrico en las instalaciones objeto de revisión. Las normas colombianas e internacionales establecen métodos ampliamente aceptados para evaluar este riesgo y sugieren acciones tendientes a evitar afectaciones al recurso humano y equipos. Se revisaron las normas actualmente vigentes tanto en el ámbito colombiano como internacional explorando los aspectos aplicables a un operador de red en los niveles de tensión aplicables por parte de estas. Mediante el presente trabajo, se estableció la metodología a emplear para la evaluación del riesgo por Arco Eléctrico en un sistema de distribución de energía y particularmente se aplicó al sistema SDL de ESSA. Esta labor fusionó los diferentes procedimientos ampliamente descritos en la bibliografía utilizada y se ajustó para una empresa de distribución de energía.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Arc Flash Study in The ESSA SDL Electrical System*

Author: Daniel Eduardo Alarcón Morales**

Keywords: Arc flash, fault current, arc current, incident energy, IEEE 1584. NFPA 70E, risk assessment.

Description:

From the point of view of a network operator or energy distribution agent and in the face of an anomalous and unforeseen situation in its electrical distribution system leading to the interruption of the energy supply, the fastest review and identification of the failed elements is required in order to restore electrical service to the affected customers. In response to these failures, the revision of the distribution substations is executed, sometimes with elements still energized, being here where all the precautions must be taken to protect the human resource and the expensive equipment. The most evident risk is the possible explosion by arc flash in the facilities under revision. Colombian and international standards establish widely accepted methods to evaluate this risk and suggest actions to avoid affecting human resources and equipment. The standards currently in vigor both in Colombia and internationally were reviewed exploring the aspects applicable to an electrical network operator in the voltage levels applicable by them. Through this work, the methodology to be used for risk assessment by Arc Flash in a power distribution system was established and particularly applied to ESSA's SDL system. This work merged the different procedures widely described in the literature used and was adjusted for a power distribution company.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas, Doctor of Electrical Engineering.

Introducción

La Electrificadora de Santander S.A. no posee un estudio de Flameo por Arco Eléctrico en las subestaciones del SDL (Sistema de Distribución Local 13,8 kV). El sistema ESSA - SDL, está conformado por los puntos más importantes para la distribución de energía los cuales deben contar con la más alta disponibilidad y confiabilidad. Es por esta razón que, ante una situación anómala e imprevista, se requiere la más rápida revisión e identificación de los elementos fallados con el fin de restablecer el servicio a los clientes afectados. Ante fallas en el suministro de energía, la revisión de las subestaciones se ejecuta, en algunas ocasiones, con elementos aún energizados dentro de estas, siendo aquí donde deben tomarse todas las precauciones para proteger de primera mano al recurso humano y posteriormente a los costosos equipos.

1. Objetivos

El objeto del presente trabajo es dejar establecida la metodología a seguir para la implementación del estudio de Flameo por Arco Eléctrico en el sistema SDL de ESSA.

Se revisaron las siguientes normas durante el desarrollo del presente trabajo:

- NFPA 70 E - 2015 Standard for Electrical Safety in the Workplace®.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)
- IEEE 1584TM Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. (2002).(IEEE Industry Applications Society, 2002)
- IEEE 1584aTM - Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, Amendment 1. (2004).(IEEE Industry Applications Society, 2004)
- IEEE 1584bTM- Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, Amendment 2: Changes to Clause 4. (2011).(IEEE Industry Applications Society, 2011)
- IEEE Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584TM.(2013).(IEEE Industry Applications Society, 2014)
- Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013, Anexo General Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE y sus modificaciones.(RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 Con Sus Ajustes, 2013)

Siguiendo los lineamientos de estas normas, se estableció el algoritmo de actividades a seguir en la determinación del método objeto de este trabajo, además con herramientas software

se modeló el sistema eléctrico de ESSA conforme lo dictamina la normativa mencionada obteniendo finalmente los parámetros y lineamientos a aplicar.

1.1 Antecedentes

La Electrificadora de Santander S.A. no posee un estudio de Flameo por Arco en las subestaciones del SDL (Sistema de Distribución Local 13,8 kV).

Las normas NFPA 70 E – 2015 (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015), IEEE 1584 en su versión 2002 (IEEE Industry Applications Society, 2002) y sus correspondientes enmiendas más complementos y EL RETIE (RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 Con Sus Ajustes, 2013), establecen los lineamientos a seguir en la determinación y cuantificación del riesgo por Arco Eléctrico.

El RETIE (RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 con sus ajustes, 2013) establece que se deben aplicar el conjunto de normas mencionadas en el literal 1.1 cuando se trata de determinar las condiciones de seguridad en el lugar de trabajo sobre elementos energizados, buscando siempre la protección de la integridad física de los trabajadores involucrados en las labores de mantenimiento correctivo y preventivo.

1.2 Estructura del Documento

El desarrollo del presente documento se presenta en cinco (5) capítulos así:

Capítulo 2: En este capítulo se describe inicialmente una serie de términos técnicos asociados con el fenómeno de Arco Eléctrico, se define el término Arco Eléctrico, se exponen las

causas que motivan su surgimiento y sus peligros asociados. Así mismo, se muestra la normatividad actualmente vigente tanto en el ámbito internacional como nacional.

Capítulo 3: En esta parte del documento, se describe en detalle la formulación matemática en la que se fundamentan las normas IEEE1584 (IEEE Industry Applications Society, 2002) y NFPA70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015) y su ámbito de aplicación, así mismo, se brinda una descripción de la metodología aplicada para el desarrollo de este trabajo, partiendo del Reconocimiento del Riesgo hasta finalizar con Los Programas de Seguridad, El Entrenamiento y el Mantenimiento del Sistema Eléctrico como herramientas para minimizar o eliminar la ocurrencia de imprevistos que puedan poner en riesgo la integridad física del recurso humano y los equipos al interior de cualquier instalación eléctrica.

Capítulo 4: Una vez descrita la metodología aquí utilizada, se procede a la aplicación de esta en las subestaciones del sistema SDL de ESSA. Estas subestaciones se escogieron, teniendo como criterio la conexión de una de ellas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) 230 kV y la segunda como una subestación típica y de importancia en la distribución de energía en el área metropolitana de Bucaramanga. Este capítulo se ocupa de describir cómo se estimaron la totalidad de los parámetros empleados en el análisis de riesgo por Arco Eléctrico de la subestación Palenque de ESSA.

Se describe, para cada parte del proceso, cómo se obtuvieron los datos técnicos y demás insumos necesarios para efectuar los cálculos matemáticos pertinentes. Cómo se desarrollaron los diagramas unifilares. Describe y muestra los resultados del Estudio de Cortocircuito, el Estudio de Coordinación de Protecciones, para terminar con el desarrollo del Estudio de Arco Eléctrico.

Capítulo 5: En este capítulo se describen las conclusiones derivadas del desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 6: Referencias Bibliográficas.

2. Conceptos para el Estudio de Arco Eléctrico

2.1 Glosario de Términos

2.1.1 Análisis del Riesgo de Arco

Un método para determinar el riesgo de lesiones personales como resultado de la exposición a la energía incidente de un flameo por Arco Eléctrico. Se denota en la bibliografía internacional como “Flash Hazard Analysis”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.2 Corriente de Falla

Una corriente que fluye de un conductor a tierra o a otro conductor debido a una conexión anormal (incluyendo un arco) entre ambos, tal como se denota en la bibliografía internacional como “Fault Current”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.3 Corriente de Falla de Arco

Una corriente de falla que fluye a través de un plasma de Arco Eléctrico, también llamada corriente de falla de arco o corriente de arco y se denota en la bibliografía internacional como “Arcing Fault Current”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.4 Corriente de Falla Disponible

En un punto específico de una instalación es la corriente eléctrica que puede proporcionar la empresa de servicios públicos, los dispositivos propios de generación de electricidad de las instalaciones y los grandes motores eléctricos también instalados, teniendo en cuenta la cantidad de impedancia en la trayectoria de la corriente. Esto se denota en la bibliografía internacional como “Available Fault Current”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.5 Corriente de Falla Franca

Corriente eléctrica que fluye a través de un cortocircuito o contacto eléctrico entre dos conductores de diferente potencial en el que la impedancia o resistencia entre los conductores es esencialmente cero. Se denota en la bibliografía internacional como “Bolted Fault Current”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.6 Descarga Eléctrica

Estimulación física que ocurre cuando la corriente eléctrica pasa a través del cuerpo humano. Se denota en la bibliografía internacional como “Electrical Shock”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.7 Distancia de Trabajo

La distancia entre el posible punto de arco y la cabeza y el cuerpo del trabajador colocado en su puesto para realizar la tarea asignada. Se distingue en la bibliografía internacional

bajo el término “Working Distance”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015).

2.1.8 Energía Incidente

Se define como la cantidad de energía calorífica potencialmente disponible dentro de un equipo, que puede imprimirse sobre una superficie a cierta distancia de la fuente y que se genera dentro de un evento de Arco Eléctrico. Se mide en cal/cm² o en J/cm². Se denota en la bibliografía internacional como “Incident Energy”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.9 Energizado

Elemento conectado eléctricamente a una fuente de tensión o que posee su propia fuente de tensión. Se denota en la bibliografía internacional como “Energized”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.10 Expuesto (Partes Vivas)

Capaz de entrar en contacto o aproximarse inadvertidamente a una distancia insegura por parte de una persona. Se aplica a las partes que no están adecuadamente protegidas, apartadas o aisladas. Se denota en la bibliografía internacional como “Exposed (Live Parts)”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.11 Frontera de Protección de Arco

Límite de aproximación a una distancia de las partes vivas no aisladas o expuestas dentro del cual una persona podría recibir una quemadura de segundo grado. Ubicarse una persona en esta región sin los elementos de protección personal apropiados puede conducir a serias lesiones al materializarse una falla por Arco Eléctrico, por lo tanto, esta condición de protección debe cumplirse sin excepción. (Sinónimo: Límite de protección contra el Arco Eléctrico). Se denota en la bibliografía internacional como “Flash-Protection Boundary” o “Arc Flash Boundary – AFB”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.12 Frontera de Aproximación Limitada

Define una frontera alrededor de los elementos energizados que personal no calificado no debe cruzar a menos que este acompañado permanentemente por personal calificado. Esta frontera es más corta que la Frontera de protección de Arco y está definida solo por el nivel de tensión del sistema. Se denota en la bibliografía internacional como “Limited Approach Boundary”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.13 Frontera de Aproximación Restringida

Define una frontera que está cerca de los elementos energizados y que solo puede cruzar personal calificado que utilice elementos de protección personal como si se hubiese

planeado entrar en contacto directo con estos. Está definida solo por el nivel de tensión del sistema. Se denota en la bibliografía internacional como “Restricted Approach Boundary”.(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

2.1.14 Peligro de Arco Eléctrico

Una condición peligrosa asociada con la liberación de energía causada por un Arco Eléctrico. Se denota en la bibliografía internacional como “Arc-Flash Hazard”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.15 Riesgo de Descarga

Una condición peligrosa asociada con la posible liberación de energía causada por el contacto o el acercamiento a partes energizadas. Se denota en la bibliografía internacional como “Shock Hazard”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.1.16 Riesgo Eléctrico

Una condición peligrosa en la que el contacto accidental o no intencionado o el fallo de un equipo puede provocar una descarga, una quemadura por Arco Eléctrico, una quemadura por alta temperatura o una explosión. Se denota en la bibliografía internacional como “Electrical Hazard”.(IEEE Industry Applications Society, 2002)

2.2 El Fenómeno Denominado Arco Eléctrico

2.2.1 Definición de Arco Eléctrico

Un Arco Eléctrico o una falla por arco, se define como el flujo de corriente eléctrica que atraviesa un medio dieléctrico ionizado (usualmente el aire) entre dos conductores energizados o desde un conductor energizado y la conexión de tierra (Davis et al., 2002). Este evento puede iniciarse por:

- Caída de Herramientas sobre elementos energizados.
 - Aislamiento defectuoso. Adyacente a elementos energizados.
 - Contacto Accidental con elementos energizados.
 - Limpieza de equipos con líquidos Inflamables. Ignición e ionización del aire.
 - Recubrimiento de residuos (suciedad). Mengua el aislamiento.
 - Corrosión de los contactos eléctricos.
 - Chispas producidas durante el cierre de interruptores, cambio de fusibles y cierre de líneas en falla.
-
- Aves, reptiles y roedores que rompen distancias de seguridad.
 - Procedimientos de trabajo inapropiados.
 - Herramientas de trabajo inapropiadas, defectuosas o que inducen al error.
 - Falta de concentración por parte de los trabajadores durante el desarrollo de sus labores.

2.2.2 Como se produce el Arco Eléctrico

La ionización inicial puede ocurrir por la caída accidental de un conductor entre dos electrodos energizados causando una falla franca de corto circuito. La temperatura de este conductor aumenta considerablemente y se derrite, ioniza el aire y produce un destello de luz.

El flujo de corriente continúa a través del aire ionizado produciendo:

- Altas Temperaturas (35000 grados Fahrenheit) (20000 grados Celsius).
- Ondas de Presión (mayores de 2000 lbs/ft²) (140,7 Kg-f/cm²) producidas por el intenso calor y la expansión del aire.
- Ondas de Sonido (mayores de 140 db).
- Expulsión de Metal Fundido (Metralla) a alta velocidad (mayores a 740 km/h).
- Aire Caliente (mayor a 500 grados Fahrenheit) (260 grados Celsius).
- Luz Intensa.
- Vapor de Cobre (de solido a vapor se expande 67000 veces).
- La energía liberada es una función de la tensión del sistema, la magnitud de la corriente de falla, la separación entre los conductores y el tiempo de despeje de la misma.

2.2.3 Peligros asociados con el Arco Eléctrico

Ondas de presión: Las ondas mecánicas de choque producidas por la explosión llegan hasta el(los) trabajador(es), lo(s) golpean con tal fuerza que son expulsados de su posición o derribados de los elementos a los que están sujetos tales como escaleras. La

magnitud de la presión mecánica sobre el rostro del trabajador puede llegar a valores mayores a 2000 lbs/ft². (140.7 Kg-f/cm²) (Davis et al., 2015).

Calor: Pueden ocurrir quemaduras fatales sobre la piel del trabajador cuando este está ubicado a unos pocos centímetros del arco. Existen pruebas que han hallado temperaturas mayores a 225 grados Celsius en las áreas de la nuca y las manos de una persona que permanezca cerca de una explosión por arco (Davis et al., 2015).

Expulsión de objetos: El Arco Eléctrico disemina gotas de metal líquido a grandes presiones y velocidades. Estas partículas pueden penetrar el cuerpo del trabajador.

El uniforme de dotación puede incendiarse, aunque el trabajador se encuentre a varios centímetros de distancia. Las áreas de la piel cubiertas por la tela pueden sufrir mayor daño que las expuestas.

Pérdida de la audición a causa del sonido emitido por la explosión. El sonido puede llegar a magnitudes de 140db a una distancia de 60 cms del arco. (Davis et al., 2015).

La probabilidad de supervivencia disminuye en la medida que aumenta la edad del trabajador afectado y la magnitud del área de la piel severamente quemada.

2.2.4 Consecuencias de un accidente por Arco Eléctrico

Todos los componentes inmersos en este fenómeno, pueden producir serias heridas a los trabajadores que se hallen cerca y pueden conducir a lesiones permanentes o a la muerte en el peor de los casos (Davis et al., 2015).

Algunas de las consecuencias típicas pueden ser:

- Costosos tratamientos médicos.
- Costosos gastos económicos asociados con demandas legales.
- Pérdida de producción de la empresa.

2.3 Marco Regulatorio

En Colombia, el marco normativo y regulatorio asociado con este fenómeno esta principalmente regido por:

2.3.1 Retie 2013

(RETIE Resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes, 2013)

El artículo 13.4 Distancias Mínimas para Trabajos en o Cerca de Partes Energizadas, imparte directrices amplias y definidas acerca de cómo enfrentar los riesgos asociados a Arco Eléctrico en las instalaciones eléctricas.

En el desarrollo descriptivo del artículo hace las siguientes recomendaciones:

- Realizar un análisis de riesgos,
- Fijar etiquetas donde se indique el nivel de riesgo,
- Realizar una correcta señalización del área de trabajo,
- Tener un entrenamiento apropiado para trabajar con tensión,
- Tener un plano actualizado y aprobado,
- Tener una orden de trabajo firmada,
- Usar equipos de protección personal certificados,

- Las personas no calificadas, no deben sobrepasar el límite de aproximación seguro.
- El límite de aproximación restringida debe ser señalado.
- Cumplir las distancias mínimas de aproximación a equipos energizados.

El RETIE hace además referencia al cumplimiento de los procedimientos seguros establecidos en las normas NFPA 70 E o IEC 60364.

2.3.2 Resolución 5018 de 2019

(Resolución Número 5018 de 2019, 2019)

El 20 de noviembre de 2019, El Ministerio del Trabajo y Seguridad Social emitió la resolución 5018 “Por la cual se establecen Lineamientos en Seguridad y Salud en el trabajo en los Procesos de Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización de la Energía Eléctrica. Esta resolución derogó por completo la resolución 1348 de 2009.

En general, aplica para toda actividad económica que se vea expuesta a peligros eléctricos, como es el caso de la intervención sobre o en cercanía de las redes eléctricas.

Específicamente el artículo 32 de la resolución establece:

“Las empresas que realicen trabajos en el sector eléctrico de acuerdo con la matriz de identificación de peligros, valoración y evaluación del riesgo, deben suministrar oportunamente a sus trabajadores y de conformidad a la labor, elementos y equipos de seguridad, requeridos para la ejecución de los trabajos, así como la reposición de los mismos cuando por su deterioro o pérdida sea requerido.

Se deberá tener en cuenta:

a) La ropa de labor para el personal será confeccionada en algodón para categoría cero, sin accesorios metálicos.

b) La empresa, apoyada en normas técnicas, aplicará un análisis de riesgos por exposición a Arco Eléctrico en cualquier nivel de tensión para cada uno de sus procesos y definirá qué tipo de protección especial se requiere considerando la exposición a corrientes de cortocircuito en las condiciones más desfavorables para cada caso.

c) La ropa y/o indumentaria de protección contra Arco Eléctrico debe ser conforme con la categoría Peligro/Riesgo establecida en la NFPA 70E, y los estudios de peligro de Arco Eléctrico realizados con el mismo propósito.”

Aquí dispone claramente que las empresas cuyo objeto social esté enmarcado dentro de esta resolución, deberán efectuar un estudio para el análisis de riesgo por Arco Eléctrico.

2.3.3 Norma NTC 2050 – Segunda actualización. (NFPA-70-2020) (NEC-2020)

La norma NTC 2050 – Segunda actualización (ICONTEC, 2020), hace mención del tema de Arco Eléctrico en su numeral 110.16 “Advertencia del Riesgo de Arco Eléctrico” y especifica la necesidad de colocar el etiquetado “Rotulado” a cada elemento que presente riesgo de Arco Eléctrico en las instalaciones eléctricas que van a ser intervenidas sin estar desenergizadas. Esta norma está en directa concordancia con la norma NFPA-70-2020 – y el NEC-2020.

2.3.4 ISO 45001-2018

(ISO 45001, 2018) Este reglamento de carácter internacional determina los requisitos para un sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo (SST) y proporciona orientación para su utilización.

Específicamente en el numeral 8.1.2, hace alusión a la eliminación de los peligros y la reducción de los riesgos para la SST.

“En orden jerárquico, deben establecerse los siguientes controles:

- Eliminar el peligro;
- Sustituir con procesos, operaciones, materiales o equipos menos peligrosos;
- Utilizar controles de ingeniería y reorganización del trabajo;
- Utilizar controles administrativos incluyendo la formación o capacitación;
- Utilizar elementos de protección personal adecuados.”

2.3.5 NFPA-70E – 2015

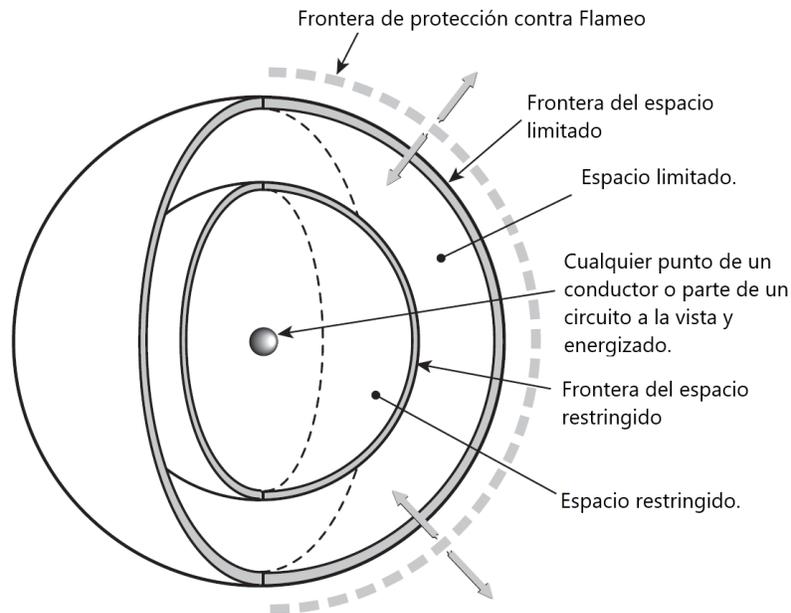
(NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015).

Norma Americana para la Seguridad Eléctrica en el Sitio de Trabajo. Esta norma aborda las prácticas de trabajo seguro relacionadas con la electricidad, los requerimientos asociados con el mantenimiento eléctrico seguro, otros controles administrativos asociados con la energía eléctrica con miras a salvaguardar la integridad de los trabajadores durante actividades tales como la instalación, inspección, operación, mantenimiento y demolición de conductores eléctricos, equipo eléctrico, conductores de comunicación y señalización y canaletas eléctricas entre otros.

Sus anexos son de carácter informativo y no hacen parte de los requerimientos de la norma.

El anexo C de esta norma (Límites de Aproximación), sugiere la determinación de los límites espaciales de aproximación a los equipos energizados que van a intervenir. Describe las pautas a cumplir asociadas con las distancias de seguridad que debería cumplir el personal que pretende efectuar una intervención sobre elementos energizados.

Figura 1.

Límites de Aproximación.

Fuente: Tomada de (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

Se introducen en este anexo, los conceptos de Frontera de Aproximación contra Flameo, Frontera de espacio limitado y Frontera de espacio Restringido.

La Frontera de Protección de Arco (Frontera de Aproximación contra Flameo), hace referencia a la distancia mínima a la que un trabajador sin portar elementos de protección personal puede acercarse a cualquier parte de un conductor o circuito energizado y a la vista y sufrir en su piel una quemadura de segundo grado recuperable ante un evento de Arco Eléctrico. La máxima cantidad de energía incidente en su piel que cumple la condición anteriormente mencionada corresponde a 1,2 cal/cm² (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015).

La Frontera de Espacio Limitado hace referencia a la mínima distancia que una persona debe guardar desde cualquier parte de un conductor o circuito energizado y a la vista que no rompa

la rigidez dieléctrica del aire y que ocasione una descarga eléctrica. Esta distancia debe calcularse inclusive teniendo en cuenta la herramienta más larga que utilice la persona. (Davis et al., 2015).

Para que una persona pueda cruzar esta frontera y entre al espacio limitado, debe estar calificada para realizar el trabajo/tarea encomendada y además debe ser capaz de identificar los peligros y riesgos asociados con la actividad desempeñada.

Para que una persona calificada pueda entrar al espacio restringido, debe cumplir los siguientes criterios:

- Tener un permiso de trabajo autorizado y firmado por su jefe inmediato superior.
- Utilizar elementos de protección personal clasificados para el nivel de tensión y energía involucrados.
- Minimizar la probabilidad de contacto directo con conductores o partes de circuitos energizados, ocasionados por movimientos inadvertidos mediante la ubicación de su cuerpo fuera del área restringida como sea posible y el uso solo de elementos protectores para el cuerpo en el espacio, en la medida de lo necesario, para ejecutar el trabajo.
- Utilice equipos y herramientas aisladas.

Respecto a Arco Eléctrico, esta norma presenta en su anexo D los métodos de cálculo tanto de la energía incidente como las fronteras de aproximación de Arco Eléctrico. Muestra diferentes métodos que pueden utilizarse para determinar estos parámetros según el rango del nivel de tensión. En este sentido, la norma presenta la siguiente tabla:

Tabla 1.

Métodos de Cálculo de energía Incidente.

Sección	Fuente	Limitaciones/Parámetros
D.2	Lee, “The Other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns”	Calcula la energía incidente y el límite de protección contra flameo para arcos al aire libre; es conservador arriba de los 600 V y se vuelve más conservador a medida que aumenta el nivel de tensión.
D.3	Doughty, et al., “Predicting Incident Energy to Better Manage the Electrical Arc Hazard on 600 V Power Distribution Systems”	Calcula la energía incidente para fallas de arco trifásicas en sistemas con niveles de tensión de 600 V e inferiores; se aplica a corrientes de cortocircuito entre 16 kA y 50 kA.
D.4	IEEE 1584, Guide for Performing Arc Flash Calculations	Calcula la energía incidente y el límite de protección contra flameo para niveles de tensión entre: 208 V a 15 kV; trifásico; 50 Hz a 60 Hz; 700 A a 106.000 A. de corriente de cortocircuito; y separación entre conductores de 13 mm a 152 mm
D.5	Doan, “Arc Flash Calculations for Exposure to DC Systems”	Calcula la energía incidente para los sistemas de cc de hasta 1000 Vcc

Fuente: Tomada de (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015).

El uso de cualquiera de estos métodos está sujeto al criterio del ingeniero que diseña.

Como se observa, se hace aquí mención de la norma IEEE 1584 como método y formulación aceptada para la evaluación del riesgo por Arco Eléctrico.

De otro lado, el anexo H presenta una guía para la selección de los trajes protectores y otros elementos de protección personal.

La última versión de esta norma fue publicada el 30 de noviembre de 2018.

2.3.6 IEEE-1584: Guía para calcular los riesgos por Arco Eléctrico.

(IEEE Industry Applications Society, 2002)

Publicada por el “Institute of Electrical and Electronics Engineers”, brinda fórmulas desarrolladas empíricamente para la determinación de las corrientes de falla de arco, límites de protección contra flameo y energía incidente. Las fórmulas son válidas para sistemas eléctricos cuyas tensiones de trabajo trifásico estén en el rango de 208 V a 15000 V. La norma no expresa

ningún procedimiento para el cálculo de energías incidentes en sistemas de corriente directa D.C. pero existen métodos aprobados para estos cálculos. La norma tampoco hace recomendaciones para la selección de los elementos de protección personal EPP.

La norma expresa que: “El propósito de la guía es permitir a la(s) persona(s) cualificada(s) analizar los sistemas de energía, con el fin de calcular la energía incidente a la que los empleados podrían estar expuestos durante las operaciones y los trabajos de mantenimiento. Los contratistas y los propietarios de las instalaciones pueden utilizar esta información para ayudar a proporcionar una protección adecuada a los empleados, de acuerdo con los requisitos de las normas aplicables en materia de seguridad de los lugares de trabajo eléctricos.”

Esta es la norma comúnmente aplicada dado que este fenómeno de Arco Eléctrico viene siendo investigado con mayor frecuencia en las instalaciones eléctricas industriales donde los niveles de tensión de 440 VAC son comúnmente utilizados.

En este trabajo se van a aplicar los procedimientos descritos en esta norma.

3. Metodología Aplicada para la Evaluación del Riesgo por Arco Eléctrico

3.1 Descripción del Método de Cálculo

A continuación, se refiere de manera breve la formulación matemática empleada en el desarrollo de este trabajo. Se fundamenta principalmente en el estándar IEEE 1584-2002 (IEEE Industry Applications Society, 2002) tomando además recomendaciones indicadas en la norma NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015).

Abordando inicialmente la sistemática consignada en el estándar IEEE 1584, su formulación matemática está basada en un modelo cuya deducción tiene un asidero netamente empírico. Este modelo fue elaborado a partir de los resultados de trescientas (300) pruebas, provocando arcos eléctricos en los electrodos de una red trifásica simulando situaciones de estos dentro de un gabinete o al aire libre. Los resultados fueron tabulados y mediante algoritmos de regresión matemática, se dedujeron las ecuaciones finales que conforman este estándar.

Este modelo es válido para las siguientes condiciones de análisis:

Tabla 2.

Umbral de utilización norma IEEE – 1584

Niveles de tensión	208 v a 15 kv
Tipo de red y de cortocircuito	Trifásico
Frecuencia de la red	50 hz a 60 hz
Magnitud de la corriente de corto circuito de falla franca	700 a a 106000 a
Separación entre electrodos	13 mm a 152 mm
Sistemas sin puesta a tierra o con cualquier tipo de esta	
La falla involucra las tres fases	

Fuente: Tomado de (IEEE Industry Applications Society, 2002)

Al efectuar los cálculos con este modelo, debe verificarse que la situación específica analizada se enmarque dentro de las condiciones anteriores con el fin de que los resultados obtenidos sean confiables y acordes con la norma.

Por otra parte, la formulación matemática se resume a continuación:

3.1.1 Cálculo de la corriente de Arco

Este valor está dado por la siguiente ecuación:

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V(\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) \quad (1)$$

Donde:

I_g : Logaritmo en base 10.

I_a : Corriente de Arco (kA).

K : constante cuyo valor es $-0,153$ para configuraciones al aire libre y $-0,097$ para configuraciones en gabinete.

I_{bf} : Corriente de falla franca (kA) para fallas trifásicas (simétrica RMS) (kA)

V : Tensión del sistema (kV).

G : es la separación entre conductores dada en (mm) (ver Tabla 3.

Factor de distancia x utilizado en 5.3 como exponente.)

Para aplicaciones con un nivel de tensión de 1000 V o más se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

Para estos niveles de tensión no se hace distinción entre configuraciones al aire libre o en gabinete.

A continuación, se debe obtener finalmente I_a así:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (3)$$

Para niveles de tensión por debajo de 1 kV, se debe, según esta metodología, calcular una segunda corriente de arco igual al 85% de I_a , de tal manera que se pueda determinar una segunda duración del arco. Este valor tiene relación directa con las curvas Tiempo-Corriente del estudio de Coordinación de protecciones, pues es bien sabido que una corriente de falla menor se traduce en un tiempo mayor de respuesta de los dispositivos que la interrumpen. Este mayor tiempo de

respuesta, se convierte al final en una mayor cantidad de energía calórica sobre el elemento que se está analizando, aumentando por ende el daño.

3.1.2 Cálculo de la Energía Incidente

Primero se debe hallar el \log_{10} de la Energía Incidente normalizada. Esta ecuación se basa en datos normalizados para una duración del arco de 200 ms y un posible punto de ubicación de la persona de 610 mm (24pulg) desde el lugar de producción del arco.

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \quad (4)$$

Donde:

E_n : es la Energía Incidente Normalizada para tiempo y distancia dada en (J/cm²)

$K1$: es una constante cuyo valor es $-0,792$ para configuraciones al aire libre (no en gabinetes) y es $-0,555$ para configuraciones en gabinete (equipo en cerramiento)

$K2$: es 0 para sistemas sin puesta a tierra y para sistemas con una alta resistencia de puesta a tierra y es $-0,113$ para sistemas con puesta a tierra.

G : Es la separación entre conductores dada en (mm) (ver Tabla 3.

Factor de distancia x utilizado en 5.3 como exponente.)

Entonces la energía Incidente Normalizada se despeja así:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5)$$

Posteriormente, se calcula la Energía incidente para el caso específico que se analiza así:

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (6)$$

Donde:

E: Es la Energía Incidente dada en (J/cm^2)

C_f : es un factor de cálculo cuyo valor es,

1,0 para tensiones del sistema sobre 1 kV, y

1,5 para tensiones del sistema iguales o menores que 1 kV

E_n : Es la Energía Incidente normalizada dada en (J/cm^2)

t: es el tiempo de duración del arco (segundos)

D: es la distancia desde el punto del posible origen del arco hasta la persona (mm).

x: es el exponente de la distancia dado por la Tabla 3.

Factor de distancia x utilizado en 5.3 como exponente.

Los demás casos se resuelven de manera similar.

Tabla 3.

Factor de distancia x utilizado en 5.3 como exponente.

Tensión del Sistema (kV)	Tipo de Equipo	Separación típica entre conductores (mm)	Factor de distancia x
0,208–1	Aire libre	10–40	2,000
	Tren de Interruptores	32	1,473
	CCM y paneles	25	1,641
	Cable	13	2,000
>1– 5	Aire libre	102	2,000
	Tren de Interruptores	13–102	0,973
	Cable	13	2,000
>5–15	Aire libre	13–153	2,000
	Tren de Interruptores	153	0,973
	Cable	13	2,000

Fuente: Tomado de (IEEE Industry Applications Society, 2002)

3.1.3 El método de Ralph Lee

(Lee, 1982)

Para aquellos casos en los que la tensión de trabajo es superior a 15kV, o la separación entre conductores esta fuera del rango de este modelo, el método teórico de Ralph Lee se puede aplicar. Este modelo esta también incluido dentro del estándar IEEE 1584 (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Con este modelo, la Energía Incidente se calcula como:

$$E = 2,142 \cdot 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (7)$$

Donde:

E: es la Energía Incidente (J/cm²)

V: es la tensión del sistema (kV)

T: es el tiempo de duración del arco (segundos)

D: es la distancia desde el punto del posible origen del arco hasta la persona (mm).

I_{bf}: Corriente de falla franca (kA) para fallas trifásicas (simétrica RMS) (kA)

Para tensiones del sistema superiores a los 15 kV, la corriente de falla de arco se considera igual a la corriente de falla franca.

3.1.4 Cálculo de La Frontera de Protección de Arco

Para el método empíricamente deducido del estándar IEEE 1584, este parámetro se calcula como:

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (8)$$

Para el método de Ralph Lee, se calcula como:

$$D_B = \sqrt{2,142 \cdot 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_b} \right)} \quad (9)$$

Donde:

D_B : es la distancia de la frontera desde el punto donde se produce el arco. (mm)

C_f : es un factor de cálculo cuyo valor es

1,0 para tensiones de trabajo por encima de 1 kV, y

1,5 para tensiones de trabajo iguales o inferiores a 1 kV,

E_n : es la Energía Incidente Normalizada.

E_B : es la Energía Incidente dada en J/cm^2 a la distancia de la Frontera de Protección de arco.

t : es el tiempo (segundos)

x : es el exponente de la distancia dado por la tabla x.

I_{bf} : es la Corriente de falla franca (kA) para fallas trifásicas (simétrica RMS) (kA)

Dentro de los objetivos del desarrollo del presente trabajo, está la elaboración de un algoritmo que describa las principales actividades para realizar un estudio de riesgo por Arco Eléctrico en el sistema SDL de ESSA.

Se han identificado los siguientes pasos a seguir:

3.2 Reconocimiento del Riesgo

El equipo encargado de este tema en ESSA deberá mantenerse informado de todos los riesgos asociados con el Arco Eléctrico en sistemas de distribución de energía mediante la asistencia a

seminarios y congresos, así como la aplicación de normativas vigentes, Resolución 5018 de 2019 (Resolución Número 5018 de 2019, 2019), el RETIE (RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 Con Sus Ajustes, 2013), NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015) e IEEE 1584 (IEEE Industry Applications Society, 2002), entre otros.

Las fallas por Arco Eléctrico representan un gran riesgo para el personal técnico dado que liberan grandes cantidades de energía térmica y ondas mecánicas de presión que se expanden en el momento de la explosión y que pueden causar heridas fatales a los técnicos que intervienen los equipos.

3.3 Evaluación del Riesgo

Las cláusulas generales para garantizar la seguridad en los sitios de trabajo definidas por el RETIE (RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 Con Sus Ajustes, 2013) y la resolución 5018 de 2019 (Resolución Número 5018 de 2019, 2019) dejan en claro que el empleador tiene la obligación de proteger a los trabajadores de los peligros por riesgo eléctrico previamente identificados. De otro lado, el diseño y la implementación de un programa eficaz de seguridad eléctrica puede ahorrar millones de pesos en pérdidas por un solo evento de Arco Eléctrico. Se debe desarrollar un plan de acción que redunde en beneficios económicos (Davis et al., 2015).

Los costos en los que se puede incurrir pueden ser:

- Tratamiento médico y psicológico de las víctimas.
- Honorarios de defensa legal.
- Multas por parte de los entes reguladores.
- Pérdida de la productividad del trabajador.

- Aumento de la prima actuarial.
- Pérdida de producción y tiempo de inactividad de la empresa.

3.4 Definición

ESSA debe definir objetivos específicos y medibles en materia de seguridad. Se debe determinar la brecha entre el programa actual de seguridad y los objetivos trazados antes mencionados. Posteriormente se debe desarrollar un plan de acción, presupuesto y línea de tiempo. En la empresa, se deben demarcar los pasos necesarios para obtener mejoras tangibles en materia de seguridad, los cuales darán cumplimiento a los estándares regulatorios actuales.

Estos estándares determinan que es necesario:

- **Actualizar los Diagramas Eléctricos** (NFPA 70E Artículo 120.2 (C) (E), 205.2) utilizados para la planificación del trabajo, verificación de tensiones, fuentes alternas de alimentación, retroalimentación por bancos de condensadores, etc.
- **Realizar un Análisis de Cortocircuito** de cada equipo (NFPA 70E Artículos 210.3, 210.5) requerido para asegurar que todo el equipo esté debidamente calificado para soportar e interrumpir la corriente de cortocircuito presente. Ver también IEEE 551, 141.
- **Realizar una adecuada Coordinación de Protecciones** -IEEE-241 (Institute of Electrical and Electronics Engineers. et al., 1991), NEC 230.1 230.8 (National Fire Protection Association, 2017) y otros- necesaria para garantizar que todos los dispositivos de protección funcionen correctamente ante la corriente de cortocircuito disponible en el sistema.
- **Realizar el Análisis de riesgo por Arco Eléctrico.**

3.5 Análisis

Como tarea, se debe posteriormente continuar con el análisis del sistema de potencia para determinar con exactitud la magnitud de la energía incidente, los requerimientos de EPP, las Fronteras de Protección de Arco, el Riesgo por Descarga Eléctrica, las Fronteras de Espacio Limitada, Restringida y Prohibida por descarga eléctrica de acuerdo con los artículos 130.1, y 103.3. de la NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015). Todo lo anterior en aquellos equipos susceptibles de intervención.

La evaluación del Riesgo por Arco Eléctrico debe incluir los siguientes pasos:

3.5.1 Identificar todos los sitios y equipos

Identificar todos los sitios y equipos para la evaluación del Riesgo por Arco Eléctrico.

3.5.2 Recolección de información de campo

Recolección de información de campo de los equipos eléctricos a partir de los datos de placa. De todo el tiempo necesario para efectuar un Análisis de Riesgo por Arco Eléctrico, esta actividad es la que demanda más tiempo y en ocasiones toma la mitad del tiempo total de la ejecución del estudio. La información necesaria para este tipo de estudios es similar a aquella necesaria para realizar un estudio de corto circuito y de coordinación de protecciones, pero aquí hay que avanzar más en el sentido de que se debe incluir todo el equipo de distribución y control de media tensión más sus alimentadores y circuitos derivados. La firma que realice el estudio de

Riesgo por Arco Eléctrico puede crear plantillas para la recolección de información de campo. Si por alguna razón, no se dispone de la información técnica de algún dispositivo, se pueden utilizar valores típicos siempre y cuando esta estrategia no conduzca a resultados subvalorados que le reste validez a la totalidad del estudio.

3.5.3 Desarrollar diagramas unifilares precisos

Desarrollar diagramas unifilares precisos que ayuden a los trabajadores a identificar los niveles de tensión, fuentes de alimentación, interruptores de acople entre barras y las múltiples configuraciones operativas del sistema que impacten directamente en los cálculos del riesgo. Se debe iniciar con la revisión de los diagramas unifilares existentes y la disposición física de los elementos en sitio, ojalá con el apoyo de personal que opere o haga mantenimiento regular a estos elementos. Los diagramas deben mostrar la totalidad de transformadores de potencia, líneas de transmisión, circuitos de distribución, sistemas de puesta a tierra, reactores y otros elementos limitadores de corriente, capacitores para control de tensiones, seccionadores, trenes de celdas incluidos sus dispositivos de protección, fusibles incluida su capacidad. Para generadores, grandes motores, trenes de celdas se deben obtener todos los datos de placa. Deberá incluir datos típicos como tensiones, rango de tensiones de los cambia tomas, capacidad de corriente, capacidad de potencia, su corriente momentánea de interrupción, los datos de su impedancia y reactancia transitoria y subtransitoria etc. Así mismo, se debe plasmar en el diagrama la totalidad de los conductores que conforman el cableado de potencia, control y servicios auxiliares, especificando su disposición (aérea o subterránea), calibres y longitudes. Con esta herramienta, se deben determinar todas las posibles configuraciones de operación del sistema eléctrico, y estas serán los

escenarios que se analicen para determinar la configuración operativa que redunde en un mayor riesgo.

3.5.4 Realizar los cálculos de cortocircuito

Realizar los cálculos de cortocircuito y evaluación de la capacidad de corto circuito de cada equipo con el fin de asegurar que todo el sistema está calificado para resistir e interrumpir la corriente de cortocircuito disponible en el sistema. Esta actividad permite verificar aquellos equipos inadecuadamente seleccionados que puedan dar como resultado una falla catastrófica. Se calculará en este ítem la corriente de cortocircuito de falla franca en los puntos a evaluar, determinando también la contribución a esta falla por parte de todos los ramales conectados a la barra en estudio. Se debe disponer de la capacidad de corto circuito (magnitud de la corriente de corto circuito trifásico) así como la relación X/R en el punto de conexión de la subestación a analizar. Para subestaciones alimentadas desde varios puntos (configuración en anillo) necesariamente exigirá el modelado de la totalidad del anillo que la surte. Para la evaluación de riesgo por Arco Eléctrico, solo se tienen en cuenta fallas trifásicas. Podría esto considerarse como una falencia, pero este fundamento es completamente consistente con las recomendaciones del estándar IEEE 1584 y NFPA 70E. Hay varias razones para esto. Primero, se considera que una falla trifásica franca es el peor de todos los escenarios y conducen a altos valores de energías incidentes. Por otra parte, de la experiencia se tiene que, ya sea al aire libre o dentro de un gabinete, las corrientes de arco que inician entre un conductor energizado y tierra, se convierten rápidamente en fallas trifásicas a medida que el aire se ioniza alrededor de los conductores de conexión trifásica.

3.5.5 Realizar una apropiada coordinación de protecciones

Realizar una apropiada coordinación de protecciones para asegurar que cada mecanismo operará apropiadamente ante la corriente de cortocircuito tanto de arco como de falla franca. Los estudios de Arco Eléctrico requieren de información actualizada y veraz respecto de los tiempos de despeje de las fallas de los dispositivos de protección por sobre corriente. Esta información se obtiene, para cada dispositivo de protección, a partir de las curvas tiempo-corriente derivadas de un estudio minucioso de coordinación de protecciones que refleje las condiciones actuales, las configuraciones y los escenarios posibles. El tiempo de apertura del interruptor debe sumarse al tiempo de respuesta del relé en la mayor parte de las aplicaciones en media y alta tensión. Dado que la información requerida para el estudio y coordinación de protecciones se recopila como parte de la información para el estudio de Arco Eléctrico, este estudio representa una magnífica oportunidad para realizar un análisis de coordinación más detallado. Si se realiza un estudio completo de coordinación, el ingeniero diseñador deberá buscar e identificar aquellos puntos donde sea posible reducir la magnitud de la energía incidente, reduciendo los tiempos de despeje de las fallas y manteniendo la sensibilidad y selectividad de todo el esquema de protecciones.

3.5.6 Determinar la corriente de Arco Eléctrico

Se debe calcular la corriente de arco para cada equipo o barra considerado dentro del estudio, utilizando cualquiera de las fórmulas descritas en el numeral 0 del presente documento. La corriente de arco puede ser una función de la corriente de falla franca trifásica, la tensión de

circuito abierto, el tipo de encerramiento y la separación entre electrodos o conductores dependiendo del método seleccionado (Davis et al., 2015).

Se debe calcular aquí la contribución de la corriente de arco por parte de cada ramal conectado a la barra en estudio aplicando la siguiente formula:

$$I_{x,arc} = I_{arc} \cdot \left(\frac{I_{x,bf}}{I_{bf}} \right) \quad (10)$$

Siendo:

$I_{x,arc}$: Corriente de falla de arco aportada por el ramal x.

I_{arc} : Corriente de falla de arco en la barra estudiada.

$I_{x,bf}$: Corriente de falla franca aportada por el ramal x.

I_{bf} : Corriente de falla franca en la barra estudiada.

3.5.7 Determinar el Tiempo de Extinción del Arco Eléctrico

Se calcula en este paso, el tiempo de duración del arco a partir de las características de los dispositivos de protección y de la magnitud de la corriente del arco que pasa a través de estos para cada rama que contribuya significativamente a la falla de arco.

El tiempo de despeje de los dispositivos de protección se obtiene a partir de sus características tiempo-corriente (TCC).

Cuando se está alimentando una barra desde varias fuentes, una falla de cortocircuito sobre esta puede ocasionar la operación de varios interruptores. La corriente de falla real va cambiando en la medida en que los interruptores se van abriendo y así las fuentes de energía se remueven de manera secuencial. De esta manera, la corriente vista por cada relé va cambiando con el tiempo y

es necesario efectuar cálculos sucesivos para determinar el tiempo final de apertura de cada interruptor. No se puede obtener el tiempo de apertura con la observación simple de la curva TCC para un ramal en particular. El método de cálculo a utilizar debe ser tal que acumule las energías incidentes en la barra analizada a medida que transcurre el tiempo de falla, teniendo en cuenta los cambios de la corriente de falla a medida que disparan los elementos de protección y se efectúan las aperturas de interruptores en tiempos diferentes.

3.5.8 Calcular la Energía Incidente

Se calcula ahora la energía incidente en cada elemento que se estudia y a las distancias de trabajo especificadas. Estas distancias se pueden estimar o se pueden tomar de los estándares IEEE 1584 o NFPA70-E. Cabe recordar aquí que la magnitud de la Energía Incidente es una función de la magnitud de la Corriente de Arco, del tiempo de duración del arco, del tipo de cerramiento, la distancia entre electrodos y de la distancia de trabajo a la cual está ubicado el trabajador.

3.5.9 Determinar El Límite de Aproximación de Arco

El Límite de aproximación de Arco es la distancia a la cual una persona expuesta al Arco Eléctrico, sin los elementos de protección personal apropiados, obtendrá una quemadura de segundo grado que es curable. El Límite de aproximación por arco es una función directa de la magnitud de la Energía Incidente. A mayor magnitud de esta energía, más lejos va a estar esta frontera. Se aplica aquí entonces la teoría expuesta en el numeral 3.1.4 de este documento.

3.5.10 Documentar los resultados

Documentar los resultados de la evaluación de Riesgo por Arco Eléctrico. La estimación del riesgo por Arco Eléctrico debe documentarse con reportes detallados, diagramas unifilares y rótulos ubicados sobre los equipos. Se deben publicar la mayor cantidad de detalles. Documentar tiene las siguientes ventajas:

- Da cumplimiento a los planes de seguridad de la empresa, los trabajadores tienen acceso a la información de los reportes y diagramas.
- Documentar da cumplimiento a la normativa como por ejemplo la NTC 2050 o la resolución 5018 de 2019.
- Cuando la normativa o el sistema eléctrico cambian, se hace fácil implementar o ajustar los resultados.
- En el evento que ocurran lesiones por Arco Eléctrico, la ausencia de este estudio y su documentación se traduce en penalizaciones para el empleador.

Los reportes producto del estudio deberían mostrar el nombre de la persona que lo dirigió, la fecha, todos los datos recopilados incluyendo los ajustes de protecciones, los supuestos utilizados por la ausencia de información, el método utilizado para la estimación del riesgo y el estándar usado evidenciando la fecha y su versión y la energía incidente y los límites de protección de arco entre otros.

De otra parte y en los diagramas unifilares, se deben plasmar los resultados del estudio sobre cada equipo que evidencie riesgo, la frontera de protección de arco, la energía incidente a la distancia de trabajo específica dada en las unidades acordes con el estándar por ejemplo en cal/cm²

y obviamente mostrar esta distancia en el diagrama y mencionar también el mecanismo de protección que está interrumpiendo la falla.

3.5.11 Elaborar los rótulos

Elaborar los rótulos para dar cumplimiento al artículo 110.21 de la norma NTC 2050 (ICONTEC, 2020), asegurando que estos se ubiquen en un lugar visible para todos los equipos y cuyo contenido muestre los resultados del caso más crítico. El rotulado debe colocarse sobre los equipos para advertir acerca de un riesgo potencial por Arco Eléctrico cuando se trabaje sobre estos y se encuentren energizados. Deben colocarse en un sitio que permita su lectura desde alguna distancia. Deben contener información acerca de la tensión nominal, la frontera límite de arco, la energía incidente a la distancia de trabajo que se calculó, la categoría de los elementos de protección personal EPP según las tablas 130.7(C)(15)(A)(b) o 130.7(C)(15)(B) de la norma NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015), la clasificación mínima de la ropa ignífuga y la clasificación de los EPP para el sitio (Davis et al., 2015).

3.6 Rotulado

Se requiere el cumplimiento de la norma NTC 2050 (ICONTEC, 2020) para el rotulado de los equipos. Siempre se debe especificar en el rotulado los resultados de la evaluación de riesgo por Arco Eléctrico del caso más crítico o el peor caso como ya se anotó.

3.7 Elementos de Protección Personal (EPP)

Los EPP son la última línea de defensa frente a la ocurrencia de un accidente, así que, la correcta selección de ellos es de vital importancia frente a los riesgos involucrados. La selección de los EPP debe realizarse una vez se obtengan los resultados de la evaluación del Riesgo por Arco Eléctrico. La norma NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015) contiene algunas categorías de EPP para enfrentar estos riesgos.

3.8 Permisos de Trabajo

Según la norma NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015) y la resolución 5018 de 2019 (Resolución Número 5018 de 2019, 2019), se requieren Permisos de Trabajo u Órdenes de Trabajo al intervenir la red energizada para tensiones por encima de los 50 V (excepto para diagnóstico) Artículo NFPA 70E 130.1. Estas documentan los procedimientos y las prácticas seguras en el sitio de trabajo, planeando la labor a realizar, como evitar los riesgos de Arco Eléctrico y determinar los requerimientos de los EPP para una tarea específica. Los permisos de trabajo u órdenes de trabajo requieren de todo este manejo, así como el consentimiento mediante la firma por parte de los coordinadores o jefes de las cuadrillas de electricistas confirmando que la labor se va a desarrollar de manera segura (Davis et al., 2015).

3.9 Programas de Seguridad

La seguridad en los sitios de trabajo de mantenimiento eléctrico debe ser uno de los propósitos de una empresa y sus empleados, además de ser la razón de ser de la norma NFPA 70E y la normativa

colombiana representada por el RETIE y la resolución 5018 de 2019. Es esencial definir labores, prácticas y procedimientos seguros debidamente documentados, dado que este conglomerado constituye la base del programa y la cultura de seguridad de una empresa.

El Arco Eléctrico es uno de los aspectos claves de un programa de seguridad que debe incluir también prácticas y procedimientos de bloqueo y etiquetado, prevención del peligro por descarga eléctrica, pruebas, herramientas, inspecciones, diagnósticos, EPP, y un sinnúmero de otras prácticas que se documentan, almacenan y se tienen como referencia y consulta. Se debe disponer de un Documento de Prácticas Eléctricas Seguras en el Trabajo elaborado en cada empresa (Davis et al., 2015).

3.10 Entrenamiento

Todos los empleados deberán recibir entrenamiento basado en un documento de Prácticas Eléctricas Seguras en el Trabajo. La capacitación debe enfatizar que cada trabajador desde su interior propenda por el trabajo seguro. Este es un aspecto clave en la construcción de una cultura de trabajo seguro que prepara a los trabajadores para manejar situaciones de emergencia.

3.11 Mantenimiento del Sistema

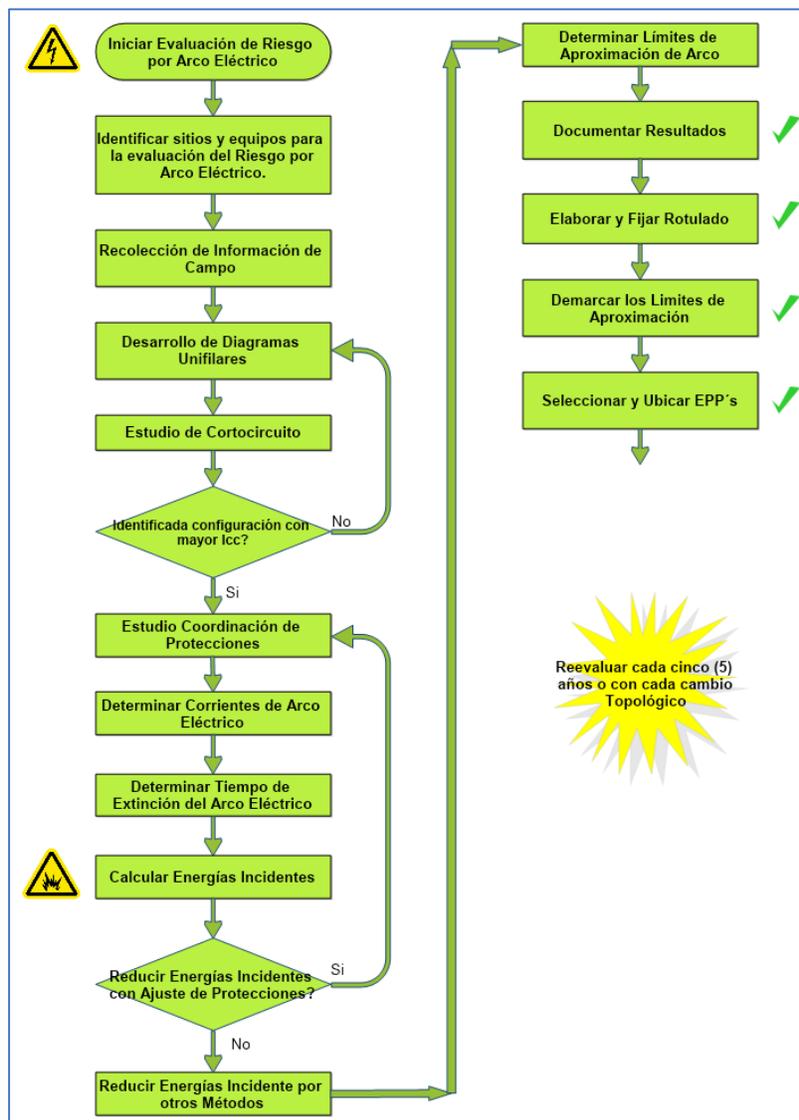
El mantenimiento de los sistemas eléctricos (incluyendo limpieza, prueba de interruptores, pruebas de aislamiento) es parte integral de un sistema eléctrico. Las pruebas y el mantenimiento de los equipos contribuyen a asegurar que estos estarán listos y plenamente operacionales además de proteger los trabajadores ante un evento imprevisto.

Todo este procedimiento debe repetirse por lo menos cada cinco (5) años si no hay cambios topológicos o en el momento en que un cambio topológico se implemente ya sea que se modifique el conexionado del sistema o entren nuevos elementos a formar parte del sistema eléctrico.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se muestra el algoritmo a seguir d e acuerdo con los lineamientos propuestos en el presente trabajo:

Figura 2.

Flujograma de actividades para la evaluación de Riesgo por Arco Eléctrico.



4. Implementación de esta Metodología en el Sistema SDL de ESSA

Para La Evaluación de Riesgo por Arco Eléctrico en el SDL de ESSA se aplicó la metodología ya descrita en el presente documento así:

4.1 Identificación de todos los sitios y equipos

Esta labor se llevó a cabo desde el principio del proceso y bajo la supervisión del personal que forma parte de los equipos de mantenimiento de subestaciones y líneas de ESSA, definiéndose como puntos de análisis las subestaciones SUR y PALENQUE. El criterio aplicado para esta selección obedece a que la subestación SUR es una de las subestaciones importantes del sistema eléctrico de ESSA dado que alimenta el sector céntrico del municipio de Bucaramanga con niveles de tensión 34,5 kV y 13,8 kV y la Subestación PALENQUE presenta conexión al Sistema de Transmisión Nacional STN y al Sistema de Transmisión Regional STR dado que presenta niveles de tensión 230 kV, 115 kV, 34,5 kV y 13,8 kV.

4.2 Recolección de información de campo

Una vez identificadas las subestaciones a intervenir, se inicia el proceso de inventario y recolección de información en campo.

Durante esta labor, se recopiló información a partir de los manuales de operación de las subestaciones, estudios previos de coordinación de protecciones, diagramas unifilares previos,

bases de datos de características de equipos de potencia y fabricantes y finalmente inventario en campo con registro fotográfico.

Toda esta información se describe en el Apéndice A. Anexos Información de Inventario del presente trabajo.

4.3 Desarrollo de Diagramas Unifilares

Una vez recopilada la información de campo, se procedió a elaborar el modelo del sistema de potencia de ESSA en el software de análisis seleccionado. A este punto es importante anotar que se utilizaron varios de estos comercialmente disponibles. Se optó finalmente por utilizar EasyPower LLC[®] por disponer de una licencia suministrada por el desarrollador para la elaboración del presente trabajo. En este software, se modeló el sistema de potencia de ESSA, incluyendo la totalidad de las subestaciones en todas las regiones. Se optó por esta metodología dado que los resultados de flujo de carga, utilizados para corroborar el modelo, deberían estar acordes con el comportamiento real del sistema lo cual garantizaría la veracidad del modelo mismo. No se utilizaron redes equivalentes.

El Apéndice B. Anexos – Resultados Evaluación De Riesgo Por Arco Eléctrico, se muestran los diagramas unifilares ya elaborados y depurados con el software de análisis conforme a la topología encontrada en cada subestación y las características de la totalidad de los equipos mostradas en el Apéndice A.

4.4 Estudio de Corto – Circuito

Una vez elaborado el modelo con el software de análisis, se procedió a probar los diferentes escenarios operativos con el fin de determinar la configuración topológica que produciría las mayores magnitudes de corriente de cortocircuito (I_{cc}) en todas las barras de las subestaciones seleccionadas, como lo indica el alcance del presente trabajo.

Se dispusieron diferentes configuraciones y producto de las diferentes disposiciones analizadas, se concluye que:

La entrada de los proyectos de expansión en el STN, STR y SDL de ESSA ha incrementado las magnitudes de las corrientes de corto circuito en el sistema eléctrico de potencia de ESSA. En la

Tabla 4.

Incremento de la I_{cc} con la entrada de proyectos de expansión en ESSA, se muestra cómo en las barras de los diferentes niveles de tensión de las subestaciones Sur y Palenque de ESSA se evidencia este fenómeno.

Tabla 4.

Incremento de la I_{cc} con la entrada de proyectos de expansión en ESSA

Falla Trifásica		Sin proyectos de Expansión	Con proyectos de Expansión
Barra Nombre	Barra kV	Corr, Sim (A)	Corr, Sim (A)
PALE-T2-138	13,8	6497,2	6745,9
PALE-T7-138	13,8	5600,6	5649,3
SUR.T1.138	13,8	7787,1	9143,3
SUR.T2.138	13,8	7125,0	9136,7
PALE.345	34,5	15286,5	20609,1
SUR-1.345	34,5	11303,1	17942,9
PALE.115	115,0	10033,5	14015,9

Por otra parte, con la inclusión en el modelo de la totalidad de los proyectos de expansión, se exploraron diferentes configuraciones operativas del sistema eléctrico de potencia de ESSA, concluyendo finalmente que el sistema en anillo (Caso Base) es la configuración que más altas magnitudes de corriente de corto circuito (Icc.) aporta a las barras de las subestaciones analizadas. Se modeló anillado todo el sistema eléctrico de potencia en los niveles de tensión de 115 kV y 34,5 kV.

En las tablas

Tabla 5.

Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Sur Caso Base vs *Des-Anillado* y

Tabla 6.

Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Palenque, Caso Base vs *Des-Anillado*, se aprecia esta variación y allí se observa lo expuesto anteriormente. Este sistema de anillado se utiliza operativamente cuando por alguna circunstancia se espera una baja confiabilidad del sistema dado que el mantenimiento o la falla en algún activo del sistema conduzca a restricciones eléctricas.

Tabla 5.

Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Sur Caso Base vs Des-Anillado

Nombre Barra	Peor Caso	Escenario	Barra kV	Corr. Falla Franca (kA)
Barra: SUR-1.345				
SUR-1.345	X	Caso Base	34,5	17,943
SUR-1.345		Des-Anillado	34,5	14,899
Barra: SUR-2.345				
SUR-2.345	X	Caso Base	34,5	17,940
SUR-2.345		Des-Anillado	34,5	14,898
Barra: SUR-T1-CKTOS				
SUR-T1-CKTOS	X	Caso Base	13,8	9,143
SUR-T1-CKTOS		Des-Anillado	13,8	8,778

Barra: SUR-T2-CKTOS				
SUR-T2-CKTOS	X	Caso Base	13,8	9,137
SUR-T2-CKTOS		Des-Anillado	13,8	8,772
Barra: SUR.T1.138				
SUR.T1.138	X	Caso Base	13,8	9,143
SUR.T1.138		Des-Anillado	13,8	8,778
Barra: SUR.T1.345				
SUR.T1.345	X	Caso Base	34,5	17,935
SUR.T1.345		Des-Anillado	34,5	14,895
Barra: SUR.T2.138				
SUR.T2.138		Caso Base	13,8	9,137
SUR.T2.138	X	Des-Anillado	13,8	8,772
Barra: SUR.T2.345				
SUR.T2.345	X	Caso Base	34,5	17,871
SUR.T2.345		Des-Anillado	34,5	14,849

Tabla 6.

Comparación de magnitud de Icc. en barras de la SE Palenque, Caso Base vs Des-Anillado

Nombre Barra	Peor Caso	Escenario	Barra kV	Corr. Falla Franca (kA)
Barra: PALE-T2-138				
PALE-T2-138	X	Caso Base	13,8	6,746
PALE-T2-138		Des-Anillado	13,8	6,663
Barra: PALE-T2-CKTOS				
PALE-T2-CKTOS	X	Caso Base	13,8	6,746
PALE-T2-CKTOS		Des-Anillado	13,8	6,663
Barra: PALE-T7-138				
PALE-T7-138	X	Caso Base	13,8	5,649
PALE-T7-138		Des-Anillado	13,8	5,591
Barra: PALE-T7-CKTOS				
PALE-T7-CKTOS	X	Caso Base	13,8	5,649
PALE-T7-CKTOS		Des-Anillado	13,8	5,591
Barra: PALE.115				
PALE.115	X	Caso Base	115	14,016
PALE.115		Des-Anillado	115	13,888
Barra: PALE.230				
PALE.230	X	Caso Base	220	13,003
PALE.230		Des-Anillado	220	12,996
Barra: PALE.345				
PALE.345	X	Caso Base	34,5	20,609
PALE.345		Des-Anillado	34,5	18,831
Barra: PALE.T2.345				
PALE.T2.345	X	Caso Base	34,5	20,604
PALE.T2.345		Des-Anillado	34,5	18,827
Barra: PALE.T7.345				
PALE.T7.345	X	Caso Base	34,5	20,603
PALE.T7.345		Des-Anillado	34,5	18,827

Esta configuración en anillo (Caso Base) será la utilizada para determinar los niveles de energía incidente en las barras de las subestaciones seleccionadas.

Por favor consultar

Tabla 7.

Resultados Cálculo de Cortocircuito *Trifásico* y el Apéndice B. Resultados de estudio de corto circuito, en donde se muestran las tablas de resultados y los diagramas unifilares con las magnitudes de las corrientes de cortocircuito trifásico realizado bajo el método ANSI en las barras de las subestaciones seleccionadas para el análisis.

Tabla 7.

Resultados Cálculo de Cortocircuito Trifásico

Falla TRIFÁSICA		Corriente Total de Falla	
Nombre Barra	Barra kV	Sim. (A)	Asim. (A)
PALE-T2-138	13,8	6745,9	10288,7
PALE-T2-CKTOS	13,8	6745,9	10288,7
PALE-T7-138	13,8	5649,3	8602,8
PALE-T7-CKTOS	13,8	5649,3	8602,8
SUR.T1.138	13,8	9143,3	13778,8
SUR.T2.138	13,8	9136,7	13767,3
SUR-T1-CKTOS	13,8	9143,3	13778,8
SUR-T2-CKTOS	13,8	9136,7	13767,3
PALE.345	34,5	20609,1	28421,3
PALE.T2.345	34,5	20604,0	28395,2
PALE.T7.345	34,5	20603,1	28390,9
SUR.T1.345	34,5	17934,6	23053,9
SUR.T2.345	34,5	17870,6	22974,0
SUR-1.345	34,5	17942,9	23074,8
SUR-2.345	34,5	17940,1	23071,3
PALE.115	115,0	14015,9	19434,4
PALE.230	220,0	13002,6	18377,6

4.5 Estudio de Coordinación de Protecciones.

Dentro de las labores de recolección de información, una de las actividades desarrolladas consistió en recopilar la totalidad de la información asociada con los dispositivos de protección de las subestaciones de potencia, conformada por los relés numéricos y su parametrización, transformadores de corriente y sus características, interruptores de potencia y sus características. Hubo elementos de los cuales no fue posible encontrar información, por lo cual se recurrió a valores típicos de las normas NFPA 70E (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015) y/o IEEE 1584 (IEEE Industry Applications Society, 2002).

Como evidencia de esta actividad, los anexos: 1.1.7 Dispositivos de Protecciones / Relés, 1.1.8 Dispositivos de Protecciones / Ajustes Implementados y 1.4. Dispositivos de protección y

sus características, muestran la totalidad de los dispositivos de protección utilizados en este modelado, sus características y la parametrización utilizada.

Respecto del modelado de los dispositivos de protección, la marca y modelo de los interruptores de potencia y los relés numéricos, fueron seleccionados en las bases de datos que posee el software de análisis utilizado. Aquellos dispositivos cuya marca y modelo no estaban presentes en las bases de datos arriba mencionadas, fueron introducidos en estas mediante las herramientas propias del software que permiten esta labor a partir de los catálogos del fabricante.

Para elaborar el estudio de Coordinación de Protecciones, una vez modelado todo el sistema, se procedió a desplegar las curvas tiempo-corriente (TCC) en las barras de nivel de tensión dos -2- (13,8 kV) de las dos subestaciones seleccionadas.

La

Figura 3.

Análisis de Coordinación de Protecciones para el Transformador T-7, Subestación Palenque, muestra el análisis de la curva TCC asociada al transformador T-7 de la subestación Palenque. Allí se observan las curvas: protección del transformador (curva “PALE T-7”), relé de protección del transformador T-7 de enlace lado de 34,5 kV (curva “R-PALE-T7-345 – 1”), relé de protección del transformador T-7 de enlace lado de 13,8 kV (curva “R-PALE-T7-138 – 1”) y finalmente la curva del relé de protección a la salida de uno de los circuitos -código 28501- (curva “R-PALE-24501-2 – 1”).

Desde el punto de vista del análisis de protecciones y dado que estas curvas son producto de la parametrización de los relés cuyos datos fueron tomados en la subestación y corroborados por el personal del Equipo de Control Medida y Protecciones de ESSA, se puede apreciar que se cumplen los principios de sensibilidad y selectividad de un estudio de esta naturaleza.

Se observa también que la separación mínima entre las curvas R-PALE-T7-345 – 1 y R-PALE-T7-138 – 1 es de 407 ms lo cual está dentro de los parámetros normales en cuanto al cumplimiento del concepto de selectividad en el estudio y coordinación de protecciones se refiere.

El Estudio de Coordinación de protecciones utilizado para la determinación del riesgo por Arco Eléctrico, debe explorar la posibilidad de disminuir los tiempos de despeje de las fallas lo cual a su vez va a influir de manera directa en el cálculo de la energía incidente tal como lo determinan las ecuaciones (6) y (7) del numeral 3.1.2 del presente trabajo. Se trata de ajustar las curvas en los diagramas TCC tiempo-corriente de tal modo que efectivamente los tiempos de despeje de las fallas disminuyan.

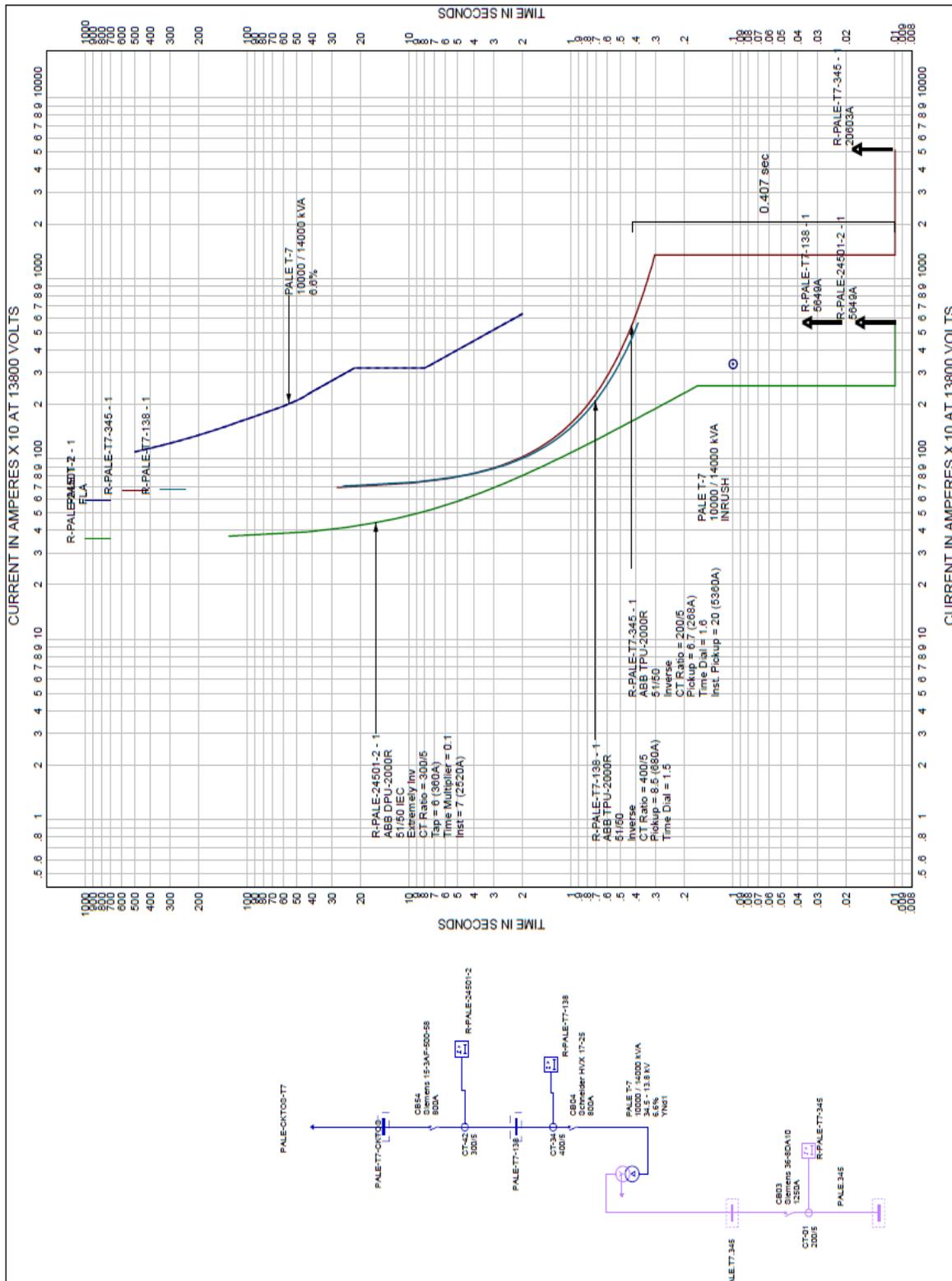
Se efectuaron estos ajustes y se planteó al personal del Equipo de Control Medida y Protecciones de ESSA esta alternativa, pero indicaron claramente que este ajuste no se puede implementar porque sería necesario modificar los ajustes en todo el esquema de protecciones de

ESSA dado que este está ajustado para los diferentes escenarios de operación y los ajustes propuestos modifican las condiciones de selectividad y sensibilidad de la actual parametrización.

Así las cosas, las curvas mostradas en los anexos del presente trabajo, corresponden a los ajustes aceptados en ESSA para su operación normal.

Figura 3.

Análisis de Coordinación de Protecciones para el Transformador T-7, Subestación Palenque



4.6 Estudio de Arco Eléctrico

Se van a incluir en este numeral las siguientes actividades descritas en el numeral 3.5 del presente trabajo como son:

- Determinación de la corriente de Arco Eléctrico.
- Determinación el Tiempo de Extinción del Arco Eléctrico.
- Cálculo de la Energía Incidente.
- Determinación del Límite de Aproximación de Arco.

Estos valores se calcularán en las barras de nivel de tensión dos (2) tal como se expresa en los objetivos del presente trabajo.

Con el software de análisis, se efectuó el cálculo aquí descrito para las barras de nivel de tensión dos (2) de las subestaciones seleccionadas (Subestaciones Sur y Palenque de ESSA). Estos barrajes se encuentran dentro de un tren de celdas (Switchgear) en cada subestación tal como se evidencia en el anexo 1.2. REGISTRO FOTOGRÁFICO del presente trabajo.

Toda la parametrización necesaria fue introducida en el software, obteniéndose los siguientes resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas al transformador T1 de la Subestación Sur:

Tabla 8.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur

Nombre de Barra con Falla por Arco	kV Barra con Falla por Arco	Nombre Dispositivo que abre aguas arriba	Nombre Barra aguas arriba	Función Disposi. que abre aguas arriba	Tipo de Equipo	Configuración de electrodos	Separación de electrodos (mm)	Corr de falla franca (kA)	Corr de Arco por falla (kA)
SUR-T1-CKTOS	13,8	R-SUR-28510-1	SUR-T1-CKTOS	51/50 IEC	Switchgear	VCB + HCB	152	9,143	8,246
SUR.T1.138	13,8	R-SUR-T1-138	SUR.T1.138	51/50 IEC	Switchgear	VCB + HCB	152	9,143	8,246
SUR.T1.345	34,5	R-SUR-T1-345	SUR.T1.345	51/50 IEC	Switchgear	VCB + HCB	308.4	17,935	17,935

Nota: Tabla generada por el software de análisis

Tabla 9.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur

Nombre de Barra con Falla por Arco	Tiempo de despeje falla (sec)	Tiempo de Apertura (sec)	Duración total de Arco (sec)	Frontera de Arco Estimada (pulg)	Frontera de Aprox. limitada (pies)	Frontera de Aprox. Restringida (pies)	Distancia de Trabajo (pulg)	Energía Incidente (cal/cm ²)	Nivel de los EPP	Descripción de los EPP
SUR-T1-CKTOS	0,016	0,065	0,081	46,3	5	2,167	18	5,7	2	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco
SUR.T1.138	0,276	0,065	0,341	110,1	5	2,167	18	24,2	3	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco, además traje con especificación de Arco
SUR.T1.345	0,016	0,07	0,086	187,6	6	2,75	32	41,2	¡Peligro!	Riesgo de Trabajo Peligroso; Prohibido trabajar Energizado

Nota: Tabla generada por el software de análisis

Figura 4.

Celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur

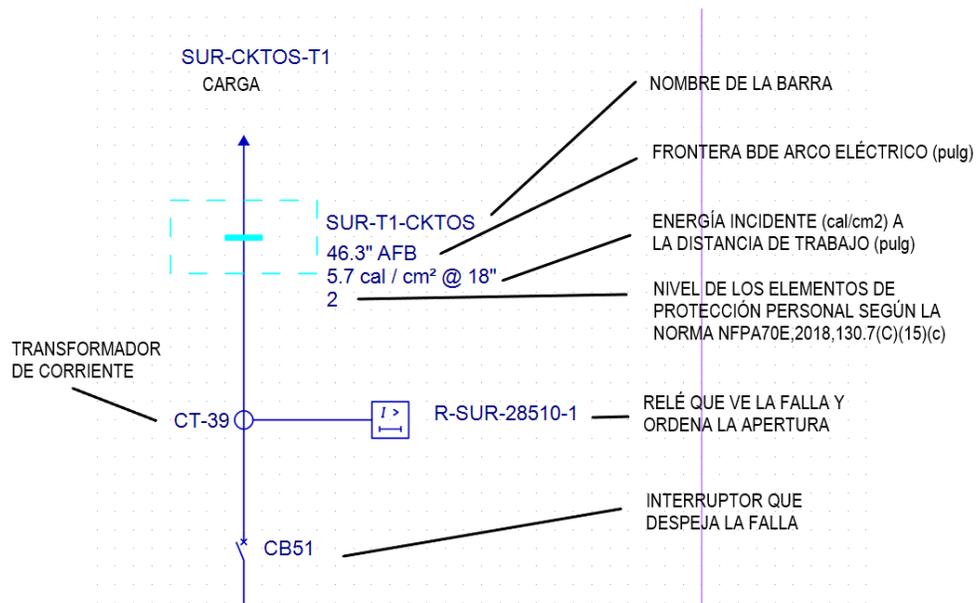


Los resultados del cálculo de Arco Eléctrico también se pueden desplegar en los diagramas unifilares cuya apariencia se describe en la Figura 5.

Resultados de Análisis de Arco en los Diagramas Unifilar.

Figura 5.

Resultados de Análisis de Arco en los Diagramas Unifilares



4.6.1 Descripción de los resultados

Como se muestra en las tablas, fotografías y diagramas de la sección 0 más atrás, y específicamente en la Figura 5.

Resultados de Análisis de Arco en los Diagramas Unifilares, en primer término se describe el nombre de la barra que para este caso es "SUR-T1-CKTOS" haciendo alusión a la barra de la que se derivan la totalidad de las celdas que alimentan los circuitos de nivel de tensión 13,8 kV que están conectados al transformador T1 de la subestación Sur.

Posteriormente y en la misma figura, se muestra el resultado del cálculo de la Frontera de Arco Eléctrico (Frontera de Protección de Arco) tal como lo especifica la ecuación (8) de la sección 0 de este trabajo. Para este caso se establece este límite de 46,3 pulgadas (110,8 cm) medidas desde el punto donde se origina el Arco Eléctrico.

A continuación, se indica el resultado del cálculo de la energía incidente en esta barra y la distancia de trabajo a la cual se obtiene dicha energía. Para este caso tenemos 5,7 (cal/cm²) a una distancia de trabajo de diez y ocho (18) pulgadas (45,7cm) medidas desde el punto donde se produce el Arco Eléctrico. Esta distancia de trabajo la especifica quien dirige el estudio y se pueden utilizar aquellos valores típicos que describe la norma IEEE 1584-2002 tabla 3.

En nuestro caso, en la

Tabla 10.

Cambio de la Energía Incidente con la distancia *barra SUR-TI-CKTOS*, se muestra el cálculo de la energía incidente a diferentes distancias de trabajo observando cómo, efectivamente, a medida que se toma una distancia mayor desde el punto donde surge el Arco Eléctrico, la magnitud de la energía incidente disminuye y por ende las exigencias en materia de los elementos de protección personal.

Tabla 10.

Cambio de la Energía Incidente con la distancia barra SUR-TI-CKTOS

Nombre de Barra con Falla por Arco	Tiempo de despeje (sec)	Tiempo de Apeyrtura (sec)	Duración total de Arco (sec)	Frontera de Arco (pulg)	Frontera de Arco (pies)	Frontera de Arco (pies)	Distancia de Trabajo (pulg)	Energía Incidente (cal/cm ²)	Nivel de Protección (EP)	Descripción de los EPP
SUR-TI-CKTOS	0,016	0,065	0,081	46,3	5	2,167	18	5,7	2	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco
							24	3,6	1	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco
							36	1,8	1	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco

Nota: Tabla generada por el software de análisis

Seguidamente y sobre la misma Figura 6.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas al transformador T1 de la Subestación Sur, el siguiente valor observado es el nivel ignífugo de los elementos de protección personal según la norma NFPA70E, 2018.130.7(C)(15)(c) que se reproduce aquí a título informativo en la

Tabla 11.

Nivel Ignífugo de los Elementos de *Protección Personal*.

Tabla 11.

Nivel Ignífugo de los Elementos de Protección Personal

Nivel Ignífugo de los Elementos de Protección Personal	
Categoría de Protección para Arco Eléctrico	Elementos de Protección Personal
1	Vestuario con especificación de Arco, Mínima especificación de 4 cal/cm ² (16,75 J/cm ²)
2	Vestuario con especificación de Arco, Mínima especificación de 8 cal/cm ² (33,5 J/cm ²)
3	Vestuario con especificación de Arco tal que la totalidad de la vestimenta cumpla con un requerimiento mínimo de 25 cal/cm ² (104,7 J/cm ²)
4	Vestuario con especificación de Arco tal que la totalidad de la vestimenta cumpla con un requerimiento mínimo de 40 cal/cm ² (167,5 J/cm ²)

Tomado de NFPA70E, 2018,130,7(C)(15)(c)

Fuente: Tomado de (NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace, 2015)

Para el ejemplo de la Figura 5.

Resultados de Análisis de Arco en los Diagramas Unifilares, y según la

Tabla 10.

Cambio de la Energía Incidente con *la distancia*, para un nivel de energía incidente de 5,7 cal/cm² debe emplearse una vestimenta de categoría 2 según lo expresado en la

Tabla 11.

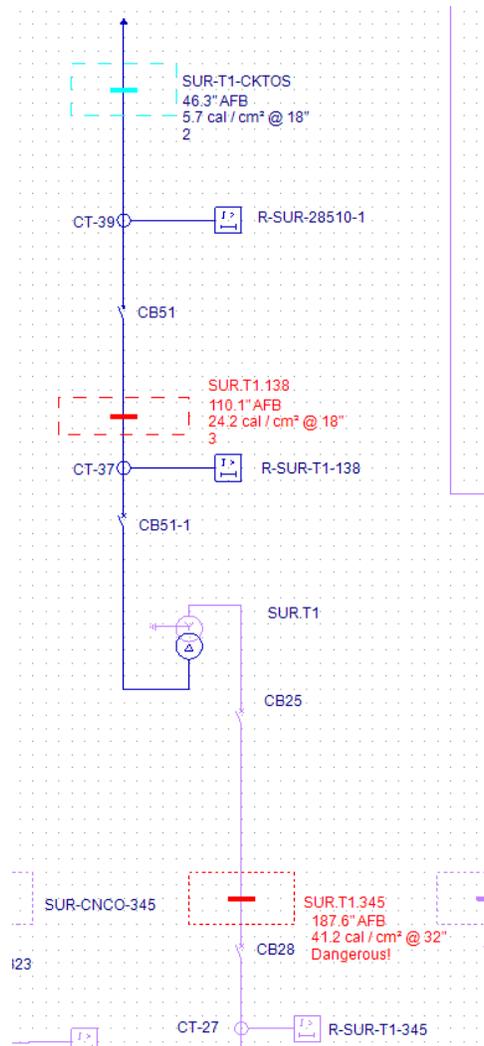
Nivel Ignífugo de los Elementos de *Protección Personal* tal como aparece en los resultados.

También, en la Figura 6.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas al transformador T1 de la Subestación Sur, se muestran los resultados obtenidos para otras barras asociadas al transformador T-1 de la subestación Sur:

Figura 6.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas al transformador T1 de la Subestación Sur



En esta figura se aprecian los resultados obtenidos para la barra “SUR.T1.138” protegido por la combinación relé R-SUR-T1-138 y transformador de corriente CT-37. Estos dos elementos dan la orden de apertura al interruptor CB51-1.

Este último interruptor, forma parte del tren de celdas de la Figura 4.

Celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación Sur y corresponde al interruptor de enlace lado de 13,8 kV asociado al transformador T1 de la subestación Sur. Como

se observa, en esta celda se ha calculado una energía incidente de 24,2 cal/cm² lo cual conduce a seleccionar una categoría de nivel 3 para los elementos de protección personal según la

Tabla 11.

Nivel Ignífugo de los Elementos de *Protección Personal*. Este resultado demuestra que en esta celda hay un riesgo más alto de lesiones y por ende se debe proteger más al operario que interactúe con ella en condiciones energizadas y ante una sospecha de falla. La demarcación de las fronteras para este tren de celdas y que determina el nivel de protección del traje a utilizar, deberá estar ajustada de acuerdo con el criterio del riesgo más alto de todas. Es decir, se toma para la delimitación de zonas en esta área, aquellos valores de energía incidente más altos, presentes en alguna de las celdas que conforman el switchgear.

Las tablas: Tabla 9.

Resultados para las celdas de 13,8 kV asociadas con transformador T1 de la Subestación *Sur* y la

Tabla 12.

Cambio de la Energía Incidente con la distancia barra *SUR.T1.138*, se muestran los resultados de las variables estudiadas en este numeral asociadas a la barra *SUR.T1.138*.

Tabla 12.

Cambio de la Energía Incidente con la distancia barra SUR.T1.138

Nombre de Barra con Falla por Arco	Tiempo de despeje y falla (sec)	Tiempo de Apertura (sec)	Duración total de Arco (sec)	Frontera de Arco Estimada (pulg)	Frontera de Aprox. limitada (pies)	Frontera de Aprox. Restringida (pies)	Distancia de Trabajo (pulg)	Energía Incidente (cal/cm ²)	Nivel de los EPP	Descripción de los EPP
SUR.T1.138	0,276	0,065	0,341	110,1	5	2,167	18	24,2	3	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco, además traje con especificación de Arco

	24	15,0	3	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco, además traje con especificación de Arco
	36	7,7	2	Camisa y pantalón con especificación de Arco u overol con especificación de Arco.

Nota: Tabla generada por el software de análisis

El Apéndice B. Resultados Estudio de Arco Eléctrico, muestra la totalidad de tablas y diagramas con los resultados asociados a las subestaciones Sur y Palenque previamente seleccionadas.

4.6.2 Elaboración del Rotulado

La norma NTC 2050 establece que se debe fijar en las instalaciones, producto del análisis de riesgo por Arco Eléctrico, el resultado de estos cálculos.

Siguiendo los lineamientos expresados en los numerales 0 y 0 del presente trabajo, una vez se obtienen los resultados descritos en los numerales anteriores, se procede a elaborar los rótulos que serán fijados en los equipos sobre los cuales se está llevando a cabo el estudio.

La norma NFPA70E especifica en su artículo 130.5(H) la información que debe contener el rotulado de los equipos como resultado final del estudio de Arco Eléctrico los cuales deben contener como mínimo:

- (1) Tensión Nominal del Sistema.
- (2) Frontera de Arco Eléctrico.
- (3) Al menos uno de los siguientes datos:

- a. Energía Incidente disponible y su correspondiente distancia de trabajo o la categoría de los Elementos de Protección Personal (EPP) tomados de las tablas 130.7(C)(15)(a) o 130.7(C)(15)(b) para el equipo, pero no ambas.

- b. Nivel mínimo de resistencia al arco de la vestimenta.

- c. El nivel de los EPP para el sitio específico.

Ahora bien, si esta norma determina la información mínima a colocar en el rotulado, la norma ANSI Z535 con sus seis (6) divisiones especifica claramente el diseño, aplicación y uso de señales y etiquetas para presentar información de seguridad y prevención de accidentes en las instalaciones de una empresa. Cubren muchos diseños esenciales, incluyendo el formato, los colores utilizados, el uso de símbolos de seguridad y más.

Siguiendo estos lineamientos, se elaboraron los rótulos para las celdas de nivel de tensión dos (2) de las subestaciones seleccionadas en el presente trabajo. Se muestra en la

Figura 7.

Rotulado de Arco Eléctrico en la barra SUR-T1-CKTOS un ejemplo para la barra SUR-T1-CKTOS.

Figura 7.

Rotulado de Arco Eléctrico en la barra SUR-T1-CKTOS

En los Apéndices 2.4.3 y 2.4.4 del presente trabajo se presentan la totalidad de los rótulos elaborados como parte de los resultados aquí obtenidos

5. Conclusiones

Se estableció la metodología a emplear para la evaluación del riesgo por Arco Eléctrico en el sistema SDL de ESSA. Esta labor fusionó los diferentes procedimientos ampliamente descritos en la bibliografía utilizada y se ajustó para una empresa de distribución de energía como lo es ESSA.

El proceso de recolección de información para esta clase de estudios es la tarea que toma más tiempo entre todas las planteadas. Es necesario establecer un repositorio de información que habrá que consultar en repetidas oportunidades durante el estudio.

Para la labor de estudio de cortocircuito, se evaluaron diferentes configuraciones topológicas del sistema eléctrico de ESSA. De este estudio de cortocircuito se concluye que la configuración que más altos niveles de cortocircuito produce en el sistema es la de cierre de los

anillos de 34,5 kV y 115 kV. Esta es una condición de operación poco probable en los últimos meses, pero se puede presentar ante contingencias.

La entrada en operación de los nuevos proyectos de expansión en los sistemas STR y STN de ESSA, incrementó las magnitudes de la corriente de cortocircuito en las barras de las subestaciones que recibieron nuevos activos, así como en las barras de las subestaciones aledañas. Este impacto se ve reflejado también en las subestaciones del SDL de ESSA. La empresa deberá tomar correctivos frente a este fenómeno con el ánimo de garantizar la seguridad operativa del sistema y como consecuencia también la seguridad del recurso humano que lo interviene.

Del estudio de coordinación de protecciones se determinaron los valores más altos de energía incidente obtenidos en las barras de nivel de tensión 2 (13,8kV) tanto en la subestación Sur (24,2 cal/cm²) como en la subestación Palenque (19,0 cal/cm²). Esto se debe a la confluencia de ocho (8) transformadores de 115/34,5 kV en el anillo de 34,5 kV de ESSA, dispuesto de esta manera con el fin de abastecer del servicio de energía a la meseta de Bucaramanga.

Se realizó el estudio y coordinación de protecciones, se propuso a ESSA un nuevo esquema de protecciones en el sistema SDL para minimizar los tiempos de despeje de las fallas, pero se recibieron observaciones desde ESSA en el sentido de que los ajustes implementados en las cabeceras de los alimentadores están coordinados con la admisión de suplencias para otros alimentadores y que en este sentido no se pueden modificar, pues un punto de ajuste para la cabecera de un circuito en una subestación debe tener coherencia con los ajustes de los circuitos de las subestaciones aledañas con las cuales se tiene suplencia.

ESSA deberá tener en cuenta para el diseño y construcción de nuevas subestaciones los estudios de Arco Eléctrico dado que de aquí se desprende información primordial para determinar el tamaño de las salas de control que alojan los trenes de celdas pues hay que efectuar el marcado

de las zonas de aproximación, así como definir los elementos de protección personal del recurso humano que interviene bajo condiciones energizadas.

Se generaron los rótulos o etiquetas a fijar en los equipos susceptibles de intervención en las subestaciones objeto de estudio, de modo tal que las cifras consignadas allí sirvan como información técnica y de seguridad para el personal técnico.

Las distancias de seguridad calculadas producto del estudio servirán para marcar en el piso de la sala de control de la subestación las zonas de seguridad con la pintura amarilla reflectiva respectiva.

Referencias Bibliográficas

Resolución Número 5018 de 2019, Pub. L. No. 1, 1 (2019).

Davis, C., St. Pierre, C., Castor, D., Luo, R., & Shrestha, S. (2002). Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards. In *ESA, Inc.* (1st ed.).

Davis, C., St. Pierre, C., Castor, D., Luo, R., & Shrestha, S. (2015). Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards, Second Edition. In *EasyPower, LLC.*

ICONTEC. (2020). *Código Eléctrico Colombiano, NTC 2050:2020*. NTC 2050. <https://www.icontec.org/lanzamiento-codigo-electrico-colombiano-ntc-2050/>

IEEE Industry Applications Society. (2002). IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. In *IEEE Std 1584TM-2002 IEEE* (Vol. 0, Issue Sept). <https://doi.org/10.1109/mspec.1975.6368719>

IEEE Industry Applications Society. (2004). IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations--Amendment 1., *IEEE Std 1584a-2004 (Amendment to IEEE Std 1584-2002)*, 0(Nov), 1–2. <https://doi.org/10.1109/mspec.1975.6367495>

IEEE Industry Applications Society. (2011). IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations--Amendment 2: Changes to Clause 4. *IEEE Std 1584b-2011 (Amendment to IEEE Std 1584-2002)*, 0(August), 1–20. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6007017>

IEEE Industry Applications Society. (2014). IEEE Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584(TM),. *IEEE Std 1584.1-2013*, 0(Feb), i–27.

<https://doi.org/10.1109/pcicon.2004.1352759>

Institute of Electrical and Electronics Engineers., IEEE Industry Applications Society. Power Systems Engineering Committee., IEEE Standards Board., & American National Standards Institute. (1991). *IEEE recommended practice for electric power systems in commercial buildings* (Vol. 1990).

ISO 45001. (2018). Sistemas de gestion de la seguridad y salud en el trabajo. ISO 45001:2018. *Secretaría Central Del ISO En Ginebra, Suiza, 1, 1–60.*
[http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3103/1/Tesis ISO 45001 Empresa Nelisa Catering Torres %2C Alexandra.pdf](http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3103/1/Tesis%20ISO%2045001%20Empresa%20Nelisa%20Catering%20Torres%20Alexandra.pdf)

Lee, R. H. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications, IA-18*(3), 246–251. <https://doi.org/10.1109/TIA.1982.4504068>

RETIE resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes, 0 Resolucion 90708 127 (2013).

National Fire Protection Association. (2017). *National Electrical Code®* (National Fire Protection Association (ed.); 2017th ed.). National Fire Protection Association.

NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace. (2015). Standard for Electrical Safety in the Workplace. In *NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace*.