

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Procedimiento para el análisis de riesgo de arco eléctrico en subestaciones de uso final y su aplicación en un caso de estudio en la UIS

Saul Ricardo Ramírez Quintero y Jorge Leonardo Torregrosa Castillo

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista.

Director

Oscar Arnulfo Quiroga

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta importante etapa en mi desarrollo personal, por brindarme la salud, la templanza de seguir adelante a pesar de los obstáculos que presenta la vida,

A mi mamá, fuente inagotable de amor, ternura y comprensión. Sus palabras oportunas e idóneas y su ejemplo, forjan en mí día a día un mejor ser humano. Su vida es para mí un gran motivo de alegría y felicidad.

A mi hermana, su entrañable paciencia, generosidad, cariño y gran consejo me guiaron en todo este caminar, de continuas enseñanzas y alegrías,

A lulú, su amor y compañía llenan siempre mi corazón de esperanza para no renunciar a mis sueños, su correcto espíritu y su mirada buena las llevo siempre presente,

A Golis, por haber dejado un legado en mi corazón de entrega y sacrificio, porque me enseñó a saber sobrellevar todas las situaciones adversas.

A la Universidad Industrial de Santander, brindándome todas las herramientas en el desarrollo de mi proceso formativo,

A los profesores de la escuela E3T, gracias por las innumerables enseñanzas, la dedicación para la docencia y su idoneidad para enseñar,

A Oscar Quiroga, su paciencia y dirección permitieron que fuese posible realizar la entrega final del documento de grado.

Saul Ramírez Q.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mis padres, Melixa Castillo y Eulalio Torregrosa, por la vida, enseñanzas, cuidado y tantas cosas buenas, desde un inicio ya sin ellos nada en mi vida sería posible,

A mi tía Rudis Castillo y mi abuela Fanny Martínez quiénes fueron parte esencial de este proceso con su apoyo constante, compañía y regaños, pero siempre de mi lado en los momentos difíciles,

A mis hermanos Darío, Carmen y Eulalio mis ejemplos en varias facetas de la vida, escudo y muchas, pero muchas veces esa palmada en la espalda para continuar,

Finalmente agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma ayudaron para mi crecimiento y poder culminar esta linda etapa de mi vida.

Jorge Torregrosa

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Tabla de Contenido

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
2. Documentación del fenómeno de arco eléctrico.....	14
3. Metodología para evaluar el riesgo de arco.....	20
3.1. Formulación de la metodología para la evaluación del riesgo.....	20
3.1.1. Metodología según la Guía Técnica Colombiana GTC 45 - 2012.....	20
3.1.2. Metodología Según el RETIE.....	26
3.1.3. Metodología AMFE (Análisis modal de fallas y efectos).....	29
3.2. Selección de la metodología para la evaluación del riesgo.....	32
3.2.1 Determinación de variables.....	32
3.2.2 Valoración de información.....	33
4. Procedimiento para la evaluación del grado de riesgo por arco en subestaciones de uso final.	33
4.1. Corriente de cortocircuito trifásica simétrica.....	33
4.2. Corriente de arco para tensiones menores a 1kV.....	34
4.3. Corriente de arco para tensiones mayores a 1kV, tanto para arco eléctrico al aire libre como en gabinete. 34	34

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

4.4.	Cálculo de la energía Incidente.....	35
4.5.	Una vez encontrada la energía incidente normalizada, se procede a transformarla a energía incidente estándar, usando la expresión:.....	36
4.6.	En el desarrollo del análisis del arco eléctrico se precisa describir la frontera de arco descrita según la IEEE 1584 denotada con la expresión empírica.	37
4.7.	Procedimiento para evaluar el nivel de Riesgo.....	38
5.	Caso de estudio: Subestación edificio de Ingeniería Eléctrica E3T.	40
5.1.	Caracterización del edificio de Ingeniería Eléctrica del campus UIS.....	40
5.2.	Justificación del diseño realizado en el Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL.	41
5.3.	Aplicación del procedimiento, para determinar el grado de peligro por arco, en la subestación de uso final del edificio de Ingeniería Eléctrica E3T.....	44
6.	Conclusiones	63
	Referencias Bibliográficas.....	65

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Lista de Figuras

Figura 1. Simulación, del sistema de potencia de la subestación del edificio E3T, utilizando Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL.....	42
Figura 2. Simulación, del sistema de potencia de la subestación del edificio E3T, utilizando Software:Power Factory DIgsilent.	43
Figura 3. Celda de Seccionamiento, subestación E3T.....	45
Figura 4. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en la celda de seccionamiento.....	48
Figura 5. Transformador Trifásico, subestación E3T.....	49
Figura 6. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el transformador.	51
Figura 7. Tablero general de baja tensión (TGBT).....	52
Figura 8. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el tablero general.	54
Figura 9. Tablero de emergencia	54
Figura 10. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el tablero de emergencia.....	56
Figura 11. Tablero de alimentadores	57
Figura 12. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el tablero de alimentadores.....	59
Figura 13. Transferencia Automática	59
Figura 14. Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en la transferencia.	62

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Lista de Tablas

Tabla 1. Determinación del nivel de exposición.....	21
Tabla 2. Determinación del nivel de deficiencia	22
Tabla 3. Determinación del nivel de probabilidad.....	23
Tabla 4. Determinación del nivel de consecuencias.	24
Tabla 5. Determinación del nivel de riesgo	24
Tabla 6. Valoración del nivel de riesgo	25
Tabla 7. Clasificación de la permitividad del riesgo según el nivel.	26
Tabla 8. Matriz de análisis de riesgos.....	27
Tabla 9. Decisiones y acciones para controlar el riesgo	28
Tabla 10. Clasificación de la frecuencia.	29
Tabla 11. Clasificación de la detección.	30
Tabla 12. Clasificación de la gravedad.	30
Tabla 13. Determinación del nivel de criticidad según el IPR.	31
Tabla 14. Factores para equipos y clases de tensión.....	35
Tabla 15. Distancias típicas de trabajo	36
Tabla 16. Categoría de los EPP según la energía incidente	38
Tabla 17. Comparativo entre Software:Power Factory Digsilent y el Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL	43
Tabla 18. Resumen del análisis de riesgo de arco eléctrico en la subestación de uso final, edificio E3T.	44
Tabla 19. Parámetros técnicos, Celda de Seccionamiento.....	45
Tabla 20. Parámetros técnicos, transformador trifásico subestación E3T	49
Tabla 21. Parámetros técnicos transferencia automática	60

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Lista de apéndices

Apéndice A. Diagrama unifilar de la subestación del Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T.

Apéndice B. Simulación del sistema de potencia de la subestación E3T utilizándose Power Factory Digsilent.

Apéndice C. Distribución de circuitos por tablero y su respectivo consumo, en el edificio de ingeniería E3T.

Apéndice D. Matriz de riesgos según la Guía Técnica Colombia GTC45 para cada elemento analizado de la subestación E3T.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Resumen

Título: Procedimiento para el análisis de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de uso final y su aplicación en un caso de estudio en la UIS*

Autor: Saul Ricardo Ramírez Quintero, Jorge Leonardo Torregrosa Castillo**

Palabras Clave: Arco eléctrico, Corriente arco eléctrico, Límite de aproximación del arco eléctrico.

Descripción:

El presente trabajo de grado procura desarrollar un procedimiento para la evaluación del nivel de riesgo por arco eléctrico que pueda aplicarse en diseño de subestaciones de uso final, realizando un análisis matemático, técnico y normativo. El análisis anterior se realiza con base en lo establecido por el RETIE en sus artículos 10 y 13, junto con las recomendaciones consignadas en la NFPA 70E para así obtener un mayor conocimiento técnico y práctico en la determinación de dicho nivel de riesgo.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor en Ingeniería Eléctrica

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Abstract

Title: Procedure for risk analysis due to electric arc in end use substations and its application in a case study in the UIS*

Author: Saul Ricardo Ramírez Quintero, Jorge Leonardo Torregrosa Castillo**

Key Words: Electric arc, electric arc current, approach limit of the electric arc.

Description:

The present degree work seeks to develop a procedure for the assessment of the level of risk by electric arc that can be applied in the design of substations of end use, performing a mathematical, technical and normative analysis. The above analysis is carried out on the basis of the provisions of Articles 10 and 13 of the RETIE, together with the recommendations contained in NFPA 70E, in order to obtain greater technical and practical knowledge in the determination of this level of risk.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.

Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Doctor in Electrical Engineering.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Introducción.

La red eléctrica está conformada por un sistema robusto componentes tales como generadores, transformadores, líneas y cargas que, en caso de entrar en falla, requieren intervenciones oportunas y rápidas para eliminar el punto de falla y reestablecer el flujo de energía. A su vez durante la operación normal del sistema se requieren intervenciones, con el fin de preservar un correcto funcionamiento del sistema. En esas intervenciones, se debe garantizar la protección integral del personal encargado el cual debe estar certificado para realizar la intervención.

Por ello es necesario que se hable de seguridad eléctrica y los riesgos asociados que la amenazan, tales como electrocución, equipo defectuoso, contacto continuo e indirecto, tensión de toque, rayos, cortocircuito, sobretensión, tensión de paso, ausencia de electricidad, y arco eléctrico. Este último riesgo (arco eléctrico) será la esencia investigativa del actual trabajo de grado abordándose con sumo detalle en aspectos técnicos claves para entender el fenómeno asociado al mismo y sus mecanismos de ocurrencia, causas, consecuencias y medidas preventivas.

En este sentido, se puede desglosar el arco eléctrico como la corriente eléctrica que permea un medio aislante (normalmente el aire) en medio de dos superficies que mantienen una diferencia de potencial. Generalmente dicha falla se presenta de manera accidental o en su defecto por exceso de contaminación en los barrajes, igualmente en la apertura de: macromedidores, condensadores, transformadores de corriente entre otros. Las implicaciones generadas por dicho fenómeno pueden variar desde situaciones leves como quemaduras hasta escenarios de incapacidad permanente.

Según la NFPA 70E en el apartado 130.4 describe los trayectos mínimos en cercanía a partes activas en sistemas de corriente alterna cuya finalidad es reducir las consecuencias de la afectación que produce la presencia de este suceso. Consecuentemente la NTC 2050 enuncia la necesidad de realizar etiquetado y marquillado de equipos ubicados en la zona de trabajo logrando destacar el nivel

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

de peligrosidad para que el encargado de realizar la maniobra pueda identificar los elementos de protección personal.

Dicha exposición simboliza una de las principales causas de muerte en el sector energético, por tanto, resulta clave realizar controles tanto ingenieriles como administrativos cuyo objeto sea la obtención de información técnica oportuna en la disminución de los niveles de exposición.

A su vez, se hace necesario profundizar en la seguridad eléctrica debido a su gran relevancia e importancia en el contexto energético, buscando así dejar un precedente técnico para análisis contiguos.

Consecuentemente, se determinará el potencial de peligrosidad referente al relámpago de arco tomando como metodología de evaluación un arreglo bidimensional propuesto por la GTC45, integrada con las recomendaciones consignadas en la NFPA 70E y requerimientos RETIE para poderse analizar el nivel de riesgo en subestaciones de uso final, ya que este tipo de mecanismo (matrices de impacto) permite la identificación y correlación de aspectos técnicos del medio que podrían influir en cualquier tipo de escenario que se pudiera presentar.

Por consiguiente, en este trabajo de grado se desarrollará un procedimiento para la determinación del nivel de riesgo eléctrico de arco eléctrico en subestaciones de uso final como base referencial el estándar NFPA 70E y las exigencias del RETIE. Como caso de estudio se tomará la subestación del edificio E3T del campus central de la UIS para ilustrar los cálculos que describan de manera detallada la intensidad del nivel de riesgo, entre otros aspectos exigidos en el RETIE.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

1. Objetivos.

1.1.Objetivo general.

Desarrollar un procedimiento para el análisis de riesgo de arco eléctrico en subestaciones de uso final basado en el estándar NFPA 70E, mostrando su aplicación a subestaciones eléctricas del campus central de la UIS.

1.2. Objetivos específicos.

Documentar el fenómeno del arco eléctrico en subestaciones de uso final haciéndose énfasis en los mecanismos de ocurrencia, las causas, consecuencias y mecanismos de mitigación.

Identificar las principales metodologías usadas para establecer el nivel de riesgo, seleccionado la más adecuada para la determinación del riesgo por arco aplicado en subestaciones de uso final.

Diseñar un procedimiento para la evaluación del grado de riesgo por arco en subestaciones de uso final basado en la metodología identificada y estableciendo los controles requeridos acorde con el estándar NFPA 70E y el RETIE.

Mostrar la aplicación del procedimiento desarrollado utilizando como caso de estudio las subestaciones de la UIS.

2. Documentación del fenómeno de arco eléctrico.

El relámpago de arco es una descarga que se presenta entre dos conductores con un gradiente de potencial y una distancia de separación entre ellos ocasionando que la corriente eléctrica rompa la rigidez dieléctrica del aire ionizado causando la expansión súbita de éste provocado por el alto poder calorífico propio del arco eléctrico. La cuantía de energía liberada en este suceso se expresa en joule por centímetro cuadrado o en calorías por centímetro cuadrado.

Este tipo de riesgo por relámpago de arco es un evento con ocurrencia de naturaleza generalmente accidental que se origina por acciones como: modificación de interruptores o algunas fracciones de él, apertura en el secundario de los TC, mantenimiento en las barras colectoras de tensión, cambio de condensadores o desinstalación de macromedidores.

A su vez por unidades, dispositivos o conexiones en mal estado; escasa capacidad para la instalación de carga eléctrica; poca distancia de seguridad; acumulación de polución, oxido o algún tipo de elemento que pueda generar conducción y malos manejos en los mantenimientos del personal operador.

A consecuencia de la gravedad del fenómeno del arco eléctrico, existe un gran interés por controlar los riesgos reflejados en el desarrollo de estándares cuantitativos, variables relacionadas y elección de elementos de seguridad. En Colombia el Reglamento Técnico (RETIE), en los términos de la Resolución 90708 de 2013 junto con estándares internacionales como la IEEE 1584 y las consideraciones de la NFPA 70E, donde se expresa el requerimiento de pruebas en todas las instalaciones para establecer los niveles energéticos

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

incidentes liberados por el arco eléctrico. (Ministerio de Minas y Energía, resolución 90708; 2013)

Los estudios de arco eléctrico están diseñados para determinar la incidencia energética, la distancia de frontera, el flujo de falla trifásica simétrica, la corriente de arco eléctrico y las medidas de seguridad junto con la indumentaria de protección personal para revelar el contexto de riesgo de la influencia del fenómeno eléctrico en cuestión. Para tomar medidas lo ideal es reducir o eliminar los peligros para el personal operativo y de mantenimiento de instalaciones eléctricas. Esta sección también explica la naturaleza del fenómeno del arco eléctrico, sus causas y riesgos asociados.

Cuando se genera un arco en cualquier zona de una la instalación eléctrica se produce un gran flujo de carga eléctrica, la corriente libera grandes cantidades de energía y radiación térmica. Depende del nivel de intensidad y duración del flameo, este fenómeno puede tener graves consecuencias, cómo:

- 1) La temperatura del arco puede alcanzar entre los 10.000°C y los 20.000°C, lo que corresponde a unos 4 o 5 veces el nivel térmico externo del sol, materiales encontrados en las zonas salientes del arco eléctrico se evaporan creando una articulación conductora entre ellos, el aumento de la corriente y la temperatura conduce a romper enlaces químicos traduciendo esto en calentamiento intenso, la expansión de masa debido a la expansión térmica, portadores de vapor de agua y metal que esparcen de manera explosiva desde el punto de inicio del arco generando un alto potencial de agresión química.
- 2) La presión aumenta rápidamente durante un período de 5 a 15 ms, alcanzando el primer máximo de hasta 0,3 MPa. Cuando las ondas de presión encuentran obstáculos generan daños a objetos y daños a operadores. Además, hay

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

un aumento repentino de la coacción en el instante de la ignición del relámpago de arco, junto con la explosión, causando una intensidad de sonido aún mayor de 140 dB, nocivo para el oído humano.

- 3) Los gases tóxicos de la descomposición del material se liberan durante la manifestación pudiéndose causar daños graves en el sistema respiratorio si se inhalan. El arco es peligroso para la población habitante en las inmediaciones porque al propagarse genera daños en el exterior de la piel y la fuerte radiación térmica puede encender los materiales circundantes. Por último, la exposición a rayos ultravioleta y radiación electromagnética infrarroja puede causar ceguera.

Los arcos pueden ser causados por las siguientes situaciones:

- **Suciedad y escombros:** Acumulación excesiva de estos elementos entre el espacio entre los electrodos, puede proporcionar un camino para la corriente y originándose la aparición de un arco eléctrico en la superficie de estos residuos.
- **Corrosión:** Presente en partes de equipos y herramientas que componen el sistema, así como en las condiciones ambientales adversas pueden llegar a ser corrosivas, permitiéndose contaminar la superficie aislante.
- **El agua se condensa y gotea:** esto puede suceder en la superficie de los elementos aislantes, provocando arcos a tierra, aumentando el potencial del arco.
- **Contacto accidental:** Contacto accidental con partes vivas.
- Daños en el aislamiento.
- La secuencia de operación es incorrecta.
- Uso y/o diseño inadecuado de sistemas y equipos.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Cuando se está realizando operaciones en sistemas con probabilidades para la ocurrencia de arco eléctrico, se requiere identificar todas las fuentes de energía, apagar la carga, verificar visualmente la desconexión, bloquear e identificar el circuito, verificar el voltaje y la conexión a tierra en todas las fuentes de alimentación. La capacitación y destreza del personal y la utilización correcta de Epp son fundamentales en cualquier mantenimiento eléctrico. Aparatos tales como gafas protectoras contra la radiación UV, usar guantes dieléctricos para voltaje nominal, ropa ignífuga, así como ropa con capucha y protección auditiva, entre otros.

Las consecuencias de un impacto de arco eléctrico en el cuerpo humano pueden ser letales hasta causar daños que pueden llevar años de tratamiento y recuperación con medicamentos. Las víctimas podrían no volver a ejercer sus labores o a lo sumo no tener la misma calidad de vida, de acuerdo con las estadísticas de la American Burn Association sobre quemaduras por arco, la supervivencia disminuye con la edad.

La amenaza de la lesión está definida por el grado, profundidad, edad del trabajador, salud subyacente en el momento de la exposición, la ubicación de la herida en el cuerpo, la extensión del daño al sistema respiratorio, el historial médico del paciente (enfermedad cardiovascular, diabetes, etc.), ya que son más inestables durante la recuperación.

Expansión es un factor clave a considerar cuando se evalúa una quema. Cuanto mayor sea el área de la quemadura, mayor será la gravedad, pérdida de plasma, devolviendo a una persona a una etapa de "conmoción" y lo pone en alto índice de infección. Rostro, miembros superiores e inferiores, genitales, dermis alrededor de los orificios naturales y la dermis en codos y rodillas son las franjas que representan las complicaciones más altas en contacto con quemaduras, porque la piel en estos lugares es más frágil, lo que resulta en una mala cicatrización de heridas y daño estético mayor si no se maneja adecuadamente. La

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

profundidad de la herida depende de la temperatura exposición y tiempo de contacto. Se clasifican de la siguiente manera:

- A. **Quemaduras de primer grado:** También conocidas como clase A, solo afecta la primera capa de la piel (epidermis). Generando irritación y dolor.
- B. **Quemaduras de segundo grado:** También llamadas tipo AB, destruyen la epidermis, excepto por el efecto sobre la dermis. Se clasifican en superficiales o profundos. Aparecen de color rosa o rojo con vesículas que contienen plasma secretada por los capilares dañados. Son propensos a la epitelización espontánea. Generando mucho dolor.
- C. **Quemaduras de tercer grado:** También conocidas como tipo B, quemaduras totales al grosor de la epidermis y pueden perturbar tejidos internos como músculos, células sanguíneas, nervios e incluso huesos. Generando costras grises llamadas escamas secretoras. Suelen ser indoloros debido a la destrucción de receptores nerviosos.

En los mecanismos de mitigación existen diferentes estrategias de protección contra arco eléctrico, la primera se centra en la prevención, tratar de prevenir la ocurrencia del evento y el segundo grupo, acción reparadora, encaminada a minimizar los daños causados por dicho evento. Mantas como mecanismos de protección contra arcos, es un método de protección que se encuentra normalizado para determinar el desempeño protector de esta; atuendo adecuado al relámpago representando el modelo normativo de descripción para eficacia de insumos textiles empleados en EPP para que el personal en el campo de la electricidad lo usen, los cuales están exteriorizados a peligros por relámpago momentáneo y a los riesgos energéticos concernientes.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Un método de mitigación del arco consiste en reducir la duración de arco en el sistema de potencia eléctrico mediante un interruptor de mantenimiento, permitiendo a un operario configurar una unidad de disparo con el objetivo de reducir el tiempo de despeje mientras el encargado de la maniobra esté desempeñando sus funciones dentro de la zona restringida del arco. Otro mecanismo de prevención consiste en un interruptor por falla de relámpago en conjunto con interruptor automático de circuito.

El sector eléctrico establece que el tiempo máximo de despeje desde el inicio del suceso hasta la desaparición del mismo no debe superar los 150 milisegundos, asimismo la NFPA 70E puntualiza omitir el análisis para el riesgo asociado si la diferencia de potencial es menor a 250 V, ya sea en corriente alterna o corriente continua y si el único transformador alimentador del sistema no excede los 125 kVA de potencia nominal, debido a que el riesgo posiblemente no se mantenga a voltajes o corrientes de cortocircuito inferiores y su energía incidente con dificultad aporta peligrosidad.

Igualmente, como mecanismo de prevención de accidentes de relámpago de arco en subestaciones de uso final se debe garantizar:

- Los tableros de potencia deben soportar los sobreesfuerzos, frentes de ondas de calor y presión provenientes de la expulsión de gases de la combustión.
- Las piezas de los equipos deben estar debidamente aseguradas para evitar desuniones si se llegase a presentar el evento en análisis
- Se deben garantizar un adecuado y correcto sistema de puesta a tierra.

Por otra parte en el relámpago por arco puntualmente se analizan las corrientes de cortocircuito trifásica, ya que es la mayor energía en falla que se puede encontrar y representa el caso más crítico, también se ha verificado que las fallas de arco eléctrico en un sistema

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

que se propaga por un medio dieléctrico (generalmente el aire) que inicia como falla monofásica tienden a aproximarse súbitamente a fallas trifásicas a razón que el aire se convierte en conductor por medio de las líneas, este rápido avance sucede en cortos instantes.

3. Metodología para evaluar el riesgo de arco.

3.1. Formulación de la metodología para la evaluación del riesgo.

Una de las principales características al momento de evaluarse cualquier tipo de riesgo es definir la manera en que se describirá de forma concreta, detallada y en profundidad la gravedad de la amenaza que se proyectará estudiar. A continuación, se expondrán diversas metodologías existentes en la elaboración de los lineamientos para la determinación, cuantificación y manejo en la apreciación del riesgo.

3.1.1. Metodología según la Guía Técnica Colombiana GTC 45 - 2012.

La guía técnica colombiana asienta un compendio de lineamientos para la determinación y control de peligros en el área de seguridad laboral, definiendo con sumo detalle aspectos que enmarcan en su procedimiento la identificación del peligro, evaluación, criterios para determinar su grado de peligrosidad, plan de acción para su control, actualización del riesgo y su correspondiente divulgación o documentación.

Según la guía técnica referencia el cálculo de ocurrencia donde se genere cualquier tipo de peligrosidad de la siguiente manera:

$$\mathbf{NR = NP * NC} \quad (1)$$

Dónde,

NR: Nivel de riesgo

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

NP: Nivel de probabilidad

NC: Nivel de consecuencia

Para obtener el nivel de probabilidad se debe tomar la siguiente expresión,

$$\mathbf{NP = ND * NE} \quad (2)$$

Dónde,

NE: Nivel de exposición

ND: Nivel de deficiencia

Conformándose una expresión general haciéndose introducir la ecuación (2) en (1),

$$\mathbf{NR = NE * ND * NC} \quad (3)$$

Enumerándose el nivel de exposición NE (Ver tabla 1) como:

Tabla 1.

Determinación del nivel de exposición.

Nivel de exposición	Valor de NE	Significado
Constante	4	El escenario desplegado se exhibe sin perturbación o en temporadas extendidas a lo largo del trabajo.
Habitual	3	El escenario desplegado se exhibe en varias ocasiones a lo largo del jornal o en breves lapsos de tiempo.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Casual	2	El escenario desplegado se exhibe ocasionalmente a lo largo del jornal y en transitorios periodos de tiempo.
Eventual	1	El escenario desplegado se exhibe de forma casual.

Nota: Adaptado de: ICONTEC (2012) *Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45.*

Enlistándose el nivel deficiencia ND (Ver tabla 1) como:

Tabla 2.

Determinación del nivel de deficiencia.

Nivel de deficiencia	Valor de ND	Significado
Muy Alta	10	Se manifiestan eventualidades que establecen el potencial referente a la concepción de incidentes o derivaciones muy relevantes.
Alta	6	Se manifiestan ciertos incidentes los cuales pueden ocasionar resultados representativos.
Mediana	2	Se manifiestan ciertos incidentes los cuales pueden ocasionar derivaciones poco relevantes.
Baja	Sin valor asignado	No se divisa derivación alguna, el peligro es reconocido como nulo o supuesto.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

La intersección de los parámetros ND y NE permiten conocer el rango de probabilidad para el análisis de riesgo, dado que la expresión matemática (2) permite relacionar las dos tablas.

Interpretándose los resultados de la tabla anterior, se desprende:

Tabla 3.

Determinación del nivel de probabilidad.

Nivel de probabilidad	Valor	Significado
Muy Alta	Entre 40 y 24	Contexto insuficiente manifestado continuamente.
Alta	Entre 20 y 10	Contexto insuficiente con exhibición ocasional
Mediana	Entre 8 y 6	Contexto insuficiente con exhibición frecuente a sucesos
Baja	Entre 4 y 2	Contexto perfectible con exhibición esporádica o nula de acontecimiento.

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Para terminarse de describir la categoría de riesgo con base a la expresión (1), se parametriza el intervalo determinante de consecuencias.

Tabla 4.

Determinación del nivel de consecuencias.

Grado de Consecuencia	NC	Def
		Perjuicios iniciación
Letal o Trágico	100	Defunción (s)
Muy grave	60	Traumatismos irremediables, discapacidad
Grave	25	Contusiones o molestias que resultan en invalidez
Intrascendente	10	Contusiones o dolencias sin necesidad de inhabilidad

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

La integración de las tablas 3 y 4 permite conocer el rango de riesgo (Ver tabla 4), dado la expresión de la ecuación (1) permite relacionar las dos tablas.

Tabla 5.

Determinación del nivel de riesgo

Nivel de riesgo $NR = NP \times NC$		Nivel de Probabilidad (NP)			
		40 - 24	20 - 10	8 - 6	4 - 2
Nivel de consecuencias (NC)	100	I 4000 - 2400	I 2000 - 1200	I 800 - 600	II 400 - 200
	60	I 2400 - 1440	I 1200 - 600	II 480 - 360	II 240 / III 120
	25	I 1000 - 600	II 500 - 250	II 200 - 150	III 100 - 50
	10	II 400 - 240	II 200 / III 100	III 80 - 60	III 40 / IV 20

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

De la tabla anterior se logran desprender varias categorías de riesgo (Ver tabla 5) y su importancia en la valoración del mismo

Tabla 6.

Valoración del nivel de riesgo

Grado de riesgo y de mediación	Cuantificación de NR	Significado
I	4000 - 600	Suceso delicado, amerita la interrupción de acciones buscando la disminución del riesgo.
II	500 - 150	Subsanar y acoger disposiciones de manera inminente.
III	120 - 40	Es necesario demostrar la participación y su beneficio.
IV	20	Conservar las disposiciones estandarizadas para ejercer el control del riesgo. Se debe priorizar en efectuar soluciones y mejoras.

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Por lo anterior, se concluye finalmente que para determinar la permisividad del riesgo (Ver tabla 6) y su control se obtiene lo siguiente.

Tabla 7.

Clasificación de la permisividad del riesgo según el nivel.

Nivel de riesgo		Definición
I	Inaceptable	Escenario delicado, requiere pronta corrección.
II	Inaceptable o aceptable	Enmendar y acoger medidas para corrección.
III	Remediable	Optimizar las medidas evaluadas.
IV	Admisible	No requiere intervención.

Nota: Adaptado de: ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file).

La matriz aumentada final según el criterio de la Guía Técnica se condensa en un arreglo bidimensional de filas y columnas, donde se estipula la zonificación del evento, así como los controles a realizar. (Ver Apéndice D. Tabla 1.)

3.1.2. Metodología Según el RETIE.

El RETIE en el desarrollo de valoración del nivel de riesgo asociado a una instalación, plantea la matriz de impacto (Ver tabla 7). Se contempla en su estructura criterios como el tipo de riesgo, tipo de eventualidad que pueda ocurrir, fuente que genera el evento, establecer si el evento es real o potencial, establecer las repercusiones ambientales, económicas, en la

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

imagen de la empresa, en personas, entre otras, así como la apreciación de la gravedad por consecuencia y su frecuencia.

Tabla 8.

Matriz de análisis de riesgos.

RIESGO A EVALUAR:		por		(al) o (en)							
		EVENTO O EFECTO (Ej: Quemaduras)		FACTOR DE RIESGO (CAUSA) (Ej: Arco eléctrico)		FUENTE (Ej: Celda de 13,8 kV)					
		POTENCIAL <input type="checkbox"/>	REAL <input type="checkbox"/>			FRECUENCIA					
C O N S E C U E N C I A S	En personas	Económicas	Ambientales	En la imagen de la empresa		E	D	C	B	A	
						No ha ocurrido en el sector	Ha ocurrido en el sector	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al mes en la Empresa	
		Una o más muertes	Daño grave en infraestructura. Interrupción regional.	Contaminación irreparable	Internacional	5	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO	MUY ALTO
		Incapacidad parcial permanente	Daños mayores, Salida de Subestación	Contaminación mayor	Nacional	4	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO
		Incapacidad temporal (>1 día)	Daños severos. Interrupción temporal	Contaminación localizada	Regional	3	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO
		Lesión menor (sin incapacidad)	Daños Importantes. Interrupción breve	Efecto menor	Local	2	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
	Molesta funcional (afecta rendimiento laboral)	Daños leves, No interrupción	Sin efecto	Interna	1	MUY BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	

Evaluador: _____ MP: _____ Fecha: _____

Nota: Adaptado de: RETIE resolución 90708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes, 0 Resolución 90708 127(2013). National Fire Protection Association. (2017). *National Electrical Code* ® (National Fire Protection Association (ed.); 2017th ed.). National Fire Association.

De acuerdo a las consideraciones resultantes en el arreglo bidimensional de análisis de riesgos anteriormente citada, se especifica un nivel de inseguridad dependiendo de la gravedad de la situación (Ver tabla 8) siendo estos niveles catalogados como: muy alta, alta, mediana, baja y muy baja, denotándose las especificaciones a realizarse en el control eficaz del peligro analizado.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Tabla 9.

Decisiones y acciones para controlar el riesgo.

Coloración	Grado de riesgo	Disposiciones y vigilancia	Ejecución
	Muy alta	Inaceptable para ejecutar la laborar. Es necesario minimizar o excluir puntos focales potencialmente riesgosos.	Ejecutar procesos alternos en caso tal de requerirse la ejecución de la actividad o trabajo.
	Alta	Disminuir. Indagar en la búsqueda de opciones que constituyan la reducción del riesgo. Incorporar el uso de EPP y medidas correlacionadas.	El HSQ o profesional encargado aprobará el concepto de trabajo seguro para ejecutar las actividades
	Mediana	Consentir. Emplear los métodos de control que permitan mejorar el medio laboral.	Se hace efectivo el diligenciamiento de formatos en base al análisis de trabajo seguro, para su respectiva aprobación.
	Baja	Aceptar. Realizar inspección frecuente, dando continuidad a los métodos definidos.	Se deben tener en cuenta, las probabilidades de falla en los procesos laborales
	Muy baja	Estar alerta a cambios	Las actividades no se ven perjudicadas.

Nota: Adaptado de: RETIE resolución 90708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes, 0 Resolución 90708 127(2013). National Fire Protection Association. (2017). *National*

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

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

3.1.3. Metodología AMFE (Análisis modal de fallas y efectos).

La metodología AMFE se utiliza principalmente para la determinación del índice de prioridad de riesgo en procesos de fabricación de productos o procesos industriales analizando los modos de falla y sus efectos, determinando criterios para el control con medidas preventivas a seguir para su disminución. Dentro de la metodología AMFE se debe asegurar, satisfacer los requerimientos de los clientes reduciendo así la tasa de falla que puedan generar no conformidades. Por ende, se requiere definir con claridad todos los términos implicados en el cálculo. Aunado a lo anterior para encontrar el índice de prioridad de riesgo se tiene,

$$\mathbf{IPR = Frecuencia * Gravedad * Detección} \quad (4)$$

Dónde,

Frecuencia representa la probabilidad de ocurrencia de la falla (Ver tabla 9)

Detección representa la posibilidad de que la falla sea identificada en las etapas previas de supervisión (Ver tabla 10)

Gravedad mide la magnitud de la falla (Ver tabla 11)

Determinando un nivel de criticidad y un rango de valoración (Ver tabla 12)

Tabla 10.

Clasificación de la frecuencia.

Grado	Riesgo	Criterio
1	Muy bajo	La falla ocurre con un índice casi nulo

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

2 - 3	Bajo	La falla ocurre esporádicamente al año
4 - 5	Medio	La anomalía ocurre alguna vez al mes
6 - 8	Alto	La falla ocurre alguna vez a la semana
9 - 10	Muy alto	La falla se repite con frecuencia

Nota: Adaptado de: Bestratén Belloví, M., M^a, R., & Ramos, O. (n.d.). *NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos*. AMFE. Insst.Es. Retrieved April 8, 2023.

Tabla 11.

Clasificación de la detección.

Grado	Riesgo	Criterio
1	Muy bajo	La anomalía no se percibe
2 - 3	Bajo	La anomalía con dificultad se denota
4 - 5	Medio	La anomalía es notoria y con seguridad no pasa los controles de seguridad y calidad
6 - 8	Alto	La anomalía casi siempre será divisada
9 - 10	Muy alto	La anomalía siempre será divisada

Nota: Adaptado de: Bestratén Belloví, M., M^a, R., & Ramos, O. (n.d.). *NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos*. AMFE. Insst.Es. Retrieved April 8, 2023,

Tabla 12.

Clasificación de la gravedad.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Grado	Riesgo	Criterio
1	Muy bajo	Se genera un riesgo menor
2 - 3	Bajo	Se genera una molestia
4 - 5	Medio	Incapacidad menor
6 - 8	Alto	Incapacidad permanente
9 - 10	Muy alto	Muerte

Nota: Adaptado de: Bestratén Belloví, M., M^a, R., & Ramos, O. (n.d.). *NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos*. AMFE. Insst.Es. Retrieved April 8, 2023,

Tabla 13.

Determinación del nivel de criticidad según el IPR.

Intervalo del IPR	Nivel de riesgo	Tipo de riesgo	Criterio
[0, 125)	1	Trivial	Peligro controlable
[125, 216)	2	Tolerable	Peligro controlable
[216, 512)	3	Importante	Medidas de mejora
[512, 729)	4	Muy importante	Medidas de mejora y controles significativos
[729, 1000)	5	Intolerable	Medidas de mejora y controles significativos

Nota: Adaptado de: Bestratén Belloví, M., M^a, R., & Ramos, O. (n.d.). *NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos*. AMFE. Insst.Es. Retrieved April 8, 2023,

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

3.2. Selección de la metodología para la evaluación del riesgo.

Para el análisis puntual del presente proyecto de grado se tomará la metodología basada en una organización bidimensional en filas y columnas llamado representación matricial, tomándose como referencia la metodología de análisis de riesgos de la guía técnica colombiana (Ver tabla 1 Apéndice D). Este modelo matemático permite el ordenamiento de la información, estableciéndose en ella los criterios como descripción de la amenaza, justificación y estimación del riesgo, pautas para instaurar intervenciones ante la presencia de arco eléctrico.

Una vez definida la forma de representarse la información, se deben tener en cuenta todos los aspectos que enmarcan la representación de los datos en una matriz de impactos, definiéndose todos los procesos influyentes en el riesgo tales como riesgos administrativos, ambientales, económicos, entre otros aspectos que pudiesen influir en una futura toma de decisiones acerca del riesgo en estudio.

Es por esto que para lograr definir con claridad los elementos que se ubicarán dentro del arreglo bidimensional en filas y columnas es clave describir:

- Determinación de variables
- Valoración de información

3.2.1 Determinación de variables.

Para cualquier proceso económico donde se involucre un tipo de amenaza de carácter operacional como es el caso de la intervención sobre o en cercanías de redes eléctricas, por tanto, a partir de la metodología escogida (representación matricial) en el reconocimiento, determinación y control del riesgo de arco eléctrico se especifica la necesidad de suministrarse oportunamente implementos de seguridad para la realización de trabajos.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

La IEEE 1584 fija criterios en la descripción técnica del evento, denotándose aspectos importantes como la energía incidente, la corriente de arco, distancia mínima y de frontera, factor de distancia que depende del nivel de tensión de puesta a tierra, distancia de trabajo e información de los implementos de seguridad laboral.

3.2.2 Valoración de información.

Así mismo, se analiza la información en el arreglo matricial de modo que nos permita inferir la severidad del impacto y proponerse ciertas recomendaciones ingenieriles en consecuencia a la falla, pretendiéndose desarrollar un procedimiento para evaluar en nivel del riesgo de relámpago por arco.

Se tomará la tabla 1. (ver Apéndice D.) para el análisis del riesgo por arco, completándose la representación de la falla junto al análisis matemático en base del estándar IEEE 1584.

4. Procedimiento para la evaluación del grado de riesgo por arco en subestaciones de uso final.

4.1. Corriente de cortocircuito trifásica simétrica.

$$I_{bf} = \frac{MVA_{base} \times 10^6}{\sqrt{3} \times V} \times \frac{100}{\%Z}$$

Donde,

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

I_{bf} : Corriente de falla trifásica (kA)

MVA_{base} : Potencia nominal del transformador

V: Tensión nominal del sistema (kV)

%Z: Impedancia del transformador

4.2. Corriente de arco para tensiones menores a 1kV.

$$\log(I_a) = k + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966(V) + 0,000526(G) \\ + 0,5588(V)(\log(I_{bf})) - 0,00304(G)(\log(I_{bf}))$$

Donde,

Log: logaritmo decimal

I_a : Corriente de arco eléctrico (kA)

k: - 0,153 para arco eléctrico al aire libre y -0,097 para arco eléctrico en gabinete

G: cercanía entre conductores (mm).

4.3. Corriente de arco para tensiones mayores a 1kV, tanto para arco eléctrico al aire libre como en gabinete.

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 (\log I_{bf})$$

Para nivel de tensión menores a 1000 V se requiere calcular nuevamente una segunda corriente de arco eléctrico tomándose I_a como $0,85I_a$ con el objetivo de considerarse las

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

variabilidades en la corriente de arco, lográndose determinar la energía incidente para ambos escenarios y escogerse la energía de mayor cuantía.

Tabla 14.

Factores para equipos y clases de tensión.

Tensión del sistema (kV)	Tipo de equipo	separación típica de conductores (mm)	Factor distancia x
0.208 - 1	Abierto	10 - 40	2.000
	Tablero de potencia	32	1.473
	CCM y tableros	25	1.641
	Cables	13	2.000
> 1 - 5	Abierto	102	2.000
	Tablero de potencia	13 - 102	0.973
	Cables	13	2.000
> 5 - 15	Abierto	13 - 153	2.000
	Tablero de potencia	153	0.973
	Cables	13	2.000

Nota: Adaptado de: NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace. (2018).

Standard for Electrical Safety in the Workplace. In *NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace*.

4.4. Cálculo de la energía Incidente.

El cálculo para la energía incidente está basado en parámetros normalizados con un tiempo de arco de 200 ms a una distancia de posible punto de arco de 61 cm (610 mm) y una separación entre conductores G en mm (Ver tabla 14)

$$\log(E_n) = k_1 + k_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011(G)$$

Donde,

En: Energía incidente normalizada (J/cm^2)

Ia: Corriente de arco eléctrico (kA)

k_1 : -0,792 para arco eléctrico al aire libre, -0,555 para arco eléctrico en gabinete

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

k_2 : 0 para sistemas sin puesta a tierra, -0,113 para sistemas con puesta a tierra

4.5. Una vez encontrada la energía incidente normalizada, se procede a transformarla a energía incidente estándar, usando la expresión:

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

Donde,

E: Energía incidente estándar (J/cm^2)

Cf: Factor de cálculo, 1 para tensiones mayores a 1kV y 1,5 menores o iguales a 1kV.

D: Distancia de trabajo (desde el posible arco hasta la persona) (mm) (Ver tabla 15)

t: Tiempo del arco (s)

X: Constante factor distancia x

Tabla 15.

Distancias típicas de trabajo

Tipo de componentes	Distancias de trabajo (mm)
Panel de distribución 15 kV	910
Panel de distribución 5 kV	910
Panel de distribución de bajo voltaje	610
CCM y tableros de potencia	455
Conductores	455
Otro	Se determinará en campo

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Nota: Adaptado de: NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace. (2018). Standard for Electrical Safety in the Workplace. In NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace.

Para tensiones mayores a 15000 V o el espacio entre conductores no está dentro del intervalo estipulado, se debe tomar la siguiente expresión para el cálculo de la energía incidente estándar, además a este nivel de tensión la corriente de cortocircuito se puede considerar igual a la corriente de arco eléctrico.

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

Donde,

D: Distancia de trabajo (desde el posible arco hasta la persona) (mm)

I_{bf}: Corriente de cortocircuito trifásica (simétrica RMS) (kA)

4.6. En el desarrollo del análisis del arco eléctrico se precisa describir la frontera de arco descrita según la IEEE 1584 denotada con la expresión empírica.

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

También se puede calcular por el método de Ralph Lee como,

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

Donde,

DB: Distancia de frontera de relámpago de arco (mm)

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

EB: Energía incidente a la distancia límite (J/cm^2), cuando la persona no tiene ningún EPP EB es igual a $5 J/cm^2$ no obstante, cuando el operario tiene algún elemento de protección personal EB es igual a la energía incidente que soporta el elemento de protección (Ver tabla 15).

Cf: Factor de cálculo, 1 para tensiones mayores a 1kV y 1,5 menores o iguales a 1kV.

Tabla 16.

Categoría de los EPP según la energía incidente

Clase EPP	Grado mínimo de protección cal /cm ²
0	Prenda normal de algodón
1	1.2 a 4
2	4.1 a 8
3	8.1 a 25
4	25.1 a 40

Nota: Adaptado de: NFPA Technical Committee on Electrical Safety in the Workplace. (2018). Standard for Electrical Safety in the Workplace. In *NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace*.

4.7. Procedimiento para evaluar el nivel de Riesgo.

En el análisis de riesgo por relámpago se evidencia la necesidad de realizarse en primera instancia el cálculo de la corrientes de cortocircuito y de arco , la distancia de frontera, energía incidente y demás parámetros que logren describir en detalle el riesgo en base a la norma IEEE1584 que describen con mayor claridad el riesgo relacionándose a su vez con la normatividad de la NFPA 70E y los requerimientos RETIE, lográndose describir

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

un procedimiento de evaluación de exposición de arco en subestaciones de uso final, subdividiéndose por etapas de la siguiente manera:

- **Primera etapa:**

Es importante reconocerse los posibles focos de riesgo de arco eléctrico, la NFPA 70E 2018, Tabla 130.7(C)(15)(a)(b) puede tomarse para verificar tanto para corriente alterna y como continua los equipos que pueden experimentar el riesgo por relámpago de arco, unificándose el criterio también según las recomendaciones del RETIE que son: mantenimiento en interruptores, abertura en TC, reparación de barrajes, apertura de macromedidores, y condensadores, teniendo así un panorama preciso sobre bajo que circunstancias y equipos se logra presentar el riesgo de arco.

- **Segunda etapa:**

Adquisición de información de todos los posibles equipos anteriormente mencionados que puedan ocasionar riesgo por relámpago de arco, tomándose los datos para el correspondiente análisis.

- **Tercera etapa:**

Cálculo de las corrientes de cortocircuito en las zonas analizadas usándose el software ECODIAL.

- **Cuarta etapa:**

Desarrollo de los cálculos de las corrientes de arco, distancias de frontera de aproximación, energías incidentes normalizada, energías incidentes estándar y demás requerimientos técnicos, usando la IEEE 1584.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

- **Quinta etapa:**

Identificar en la metodología elegida (Matriz de impactos GTC 45) todos los riesgos de arco eléctrico en la subestación de uso final, detallándose según el nivel de riesgo identificado los elementos de protección personal según la NFPA 70E en la tabla 130.7(C)(15)(c) y la tabla 130.5(G) donde se habla de la categoría de los EPP y se denota la selección de la vestimenta resistente al arco.

- **Sexta etapa:**

Realización de marquillado y etiquetas de cada equipo en estudio para lograrse evitar cualquier tipo de accidente describiéndose a su vez mecanismos de mitigación descritos en la NFPA 70E.

5. Caso de estudio: Subestación edificio de Ingeniería Eléctrica E3T.

Como caso de estudio en la aplicación del procedimiento de peligro de arco se tomará la subestación eléctrica del edificio E3T (Eléctrica, electrónica y telecomunicaciones) del campus universitario UIS, así mismo se tomará el diseño del plano de planta del diagrama unifilar de la subestación para identificar los puntos donde se pueda desarrollar el procedimiento por relámpago de arco eléctrico.

5.1. Caracterización del edificio de Ingeniería Eléctrica del campus UIS.

El abastecimiento de potencia del edificio de ingeniería eléctrica se realiza por medio de una red subterránea trifásica trifilar de media tensión 13,2 kV con un conductor por fase XLPE-15kV No.2 AWG en cobre, una vez la red de media tensión se aproxima a la subestación de la E3T ingresa a la celda de remonte con barraje y aislamiento a 15 kV,

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

posteriormente pasa a la celda de seccionamiento tripolar con fusible tipo HH de 40A y alistamiento a 17.5 kV para después conectarse a un transformador trifásico Dyn5 con potencia nominal de 630 kVA con bóveda en concreto con resistencia al fuego de 3 horas.

La subestación además de lo descrito anteriormente cuenta con planta de emergencia con capacidad nominal de potencia de 260 kVA, tablero para la transferencia automática, tablero de emergencia y tablero general de baja tensión para alimentar los respectivos circuitos propios del edificio.

En el tablero general de baja tensión (TGBT) abastece así mismo a unos subtableros como lo son los tableros de piso (TP1, TP2, TP3, TP4), como también los tableros de los aires acondicionados (TAA-1 y TAA-2).

El Tablero de emergencia abastece así mismo subtableros como: TP5, TIE, RAC, TBH, TREG, TAUTO y TASC. Donde TP5 representa el tablero de piso del quinto piso, TIE que alimenta la carga de la iluminación de emergencia del primero, segundo, tercero y cuarto piso, RAC que alimenta los equipos de automatización de todo el edificio, TBH que alimenta el tablero de bombas hidráulicas, TREG que alimenta el tablero regulado del quinto piso, TAUTO que alimenta la iluminación de emergencia del quinto piso y TASC que corresponde al circuito del nuevo ascensor instalado en la escuela E3T.

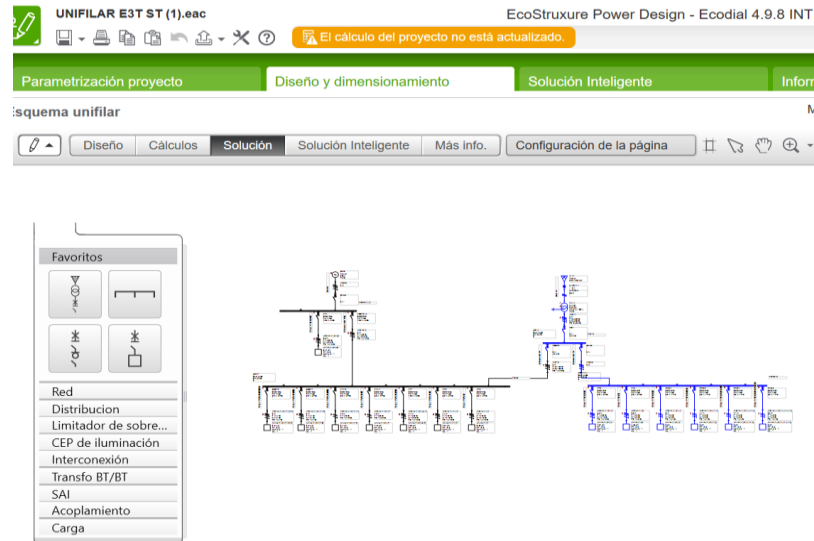
Aunado a lo anterior se expone el diagrama unifilar de la subestación del edificio de ingeniería eléctrica del campus UIS. (Ver Apéndice A.)

5.2. Justificación del diseño realizado en el Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Figura 1.

Simulación, del sistema de potencia de la subestación del edificio E3T, utilizando Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL



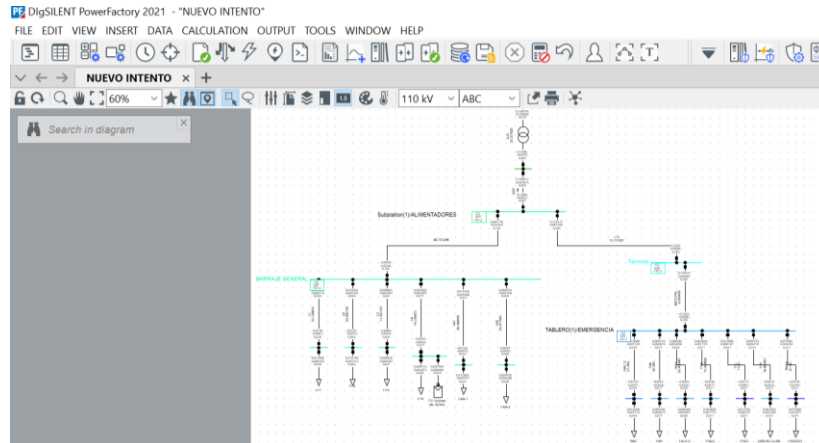
Se había propuesto solucionar el problema de encontrar las corrientes de falla simétrica trifásicas en los tableros de potencia usando el software EcoStruxure Power Design ECODIAL (ver figura 1) pero debido a las continuas restricciones que presenta la aplicación se impidió hallarse las corrientes necesarias para el cálculo del peligro de relámpago, ya que el programa no permite simular el sistema eléctrico por medio de dos fuentes de alimentación simultáneamente. A su vez no existen algunos elementos en el modelado como lo es el sistema fotovoltaico, adicionalmente la operación unidireccional de las protecciones impiden la correcta simulación del sistema.

De acuerdo a esto, se decidió usar el software Power Factory Digsilent (Ver figura 2) para dar solución al problema de encontrar las corrientes trifásicas en los puntos de interés.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Figura 2.

Simulación, del sistema de potencia de la subestación del edificio E3T, utilizando Software: Power Factory Digsilent.



A continuación, se realiza una pequeña comparación entre el software Power Factory Digsilent y el software EcoStruxure Power Design ECODIAL (Ver tabla 17) resaltándose algunas características importantes de cada interfaz.

Tabla 17.

Comparativo entre Software: Power Factory Digsilent y el Software: EcoStruxure Power Design ECODIAL

<i>Características Técnicas</i>	
<i>Power Factory Digsilent</i>	<i>Power Design ECODIAL</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de flujo de potencia. - Análisis de cortocircuitos y fallas. - Análisis de redes de MT / BT. - Análisis de arco eléctrico, energía incidente, corriente de arco, corriente de falla, categoría de riesgo, distancia de frontera, etc. - Parametrización de conductores y equipos. - Análisis de armónicos y calidad de la energía. - Hay un gran número de elementos en el modelado como lo son los generadores, transformadores, cargas, paneles fotovoltaicos, baterías, motores, etc. - Interfaz con una alta calidad en la visualización de gráficos. <ul style="list-style-type: none"> - Entre otros aspectos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño energético más eficiente y fiable. <ul style="list-style-type: none"> - Coordinación de protecciones - Interfaz intuitiva que busca comprobar la coherencia de la red antes de realizar cualquier tipo de proyecto, localizando errores en el diagrama del sistema de potencia. - Elabora informes del diseño y cálculo de las soluciones dadas por el software.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

El software Power Factory Digsilent es una herramienta ingenieril que permite simular distintos escenarios en cuanto al análisis de flujos de potencia, pudiéndose destacar la incorporación de paneles fotovoltaicos a la red. A su vez posee un modo de estudio como lo es el escenario del análisis de arco eléctrico por medio de varios estándares ya incluidos en el software (Estándar NFPA 70E, IEEE 1584), permitiéndose verificar de antemano los cálculos matemáticos previamente obtenidos.

5.3. Aplicación del procedimiento, para determinar el grado de peligro por arco, en la subestación de uso final del edificio de Ingeniería Eléctrica E3T.

Tabla 18.

Resumen del análisis de riesgo de arco eléctrico en la subestación de uso final, edificio E3T.

Zona identificada	Interpretación del nivel de riesgo	Categoría EPP	Detalle
Celda de Seccionamiento	Bajo	1	Pág. 41
Transformador	Bajo	1	Pág. 45
Tableros alimentadores	Bajo	1	Pág. 57
Tablero general baja tensión	Bajo	1	Pág. 49
Tablero de Emergencia	Bajo	0	Pág. 53
Transferencia	Bajo	1	Pág. 61

En la tabla 18 se realiza un resumen en la identificación y análisis de riesgo de arco en la subestación de uso final del edificio E3T. Es importante aclarar que el detalle técnico

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

de cada zona es desarrollado en profundidad en la respectiva página mencionada de la última columna de la ilustración.

Se identifica en el esquema unifilar de la subestación ciertos puntos importantes para determinar el análisis del peligro por relámpago, como primera zona de riesgo se identifica la celda de seccionamiento (Ver figura 3) con datos técnicos característicos de fabricante (Ver tabla 18)

Figura 3.

Celda de Seccionamiento, subestación E3T



Tabla 19.

Parámetros técnicos, Celda de Seccionamiento

Características Técnicas del Seccionador bajo carga	
MARCA	SOCOL S. A
TIPO	GAV/V 17
TENSIÓN MÁXIMA	17,5 (kV)
TENSIÓN DE SOPORTABILIDAD AL IMPULSO TIPO RAYO	110 (kV)
CORRIENTE NOMINAL	630 (A)

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

CORRIENTE CORTOCIRCUITO	40 (kA)
CORRIENTE NOMINAL TÉRMICA	16 (kA)

Según la NFPA 70E para calcular la energía incidente derivada del relámpago de arco en equipos superiores a 600 V el análisis asume el caso más extremo cuando se supone cero la impedancia de falla por ende suponiéndose la corriente de arco eléctrico igual a la corriente máxima de falla. La conjetura para la energía incidente está basada en parámetros normalizados con un tiempo de arco de 200 ms (0.2 s), a una distancia mínima de trabajo de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores para este nivel de tensión de 153 mm y un factor de distancia de 0,973. La tensión del sistema en esta parte es de 15 kV, utilizándose la siguiente expresión estandarizada de la IEEE1584 para el cálculo de la energía térmica en la celda de seccionamiento:

$$I_{bf} = I_a = 3,976 \text{ kA}$$

Dónde

I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica (simétrica RMS) (kA)

La energía incidente normalizada se deduce de:

$$\log(E_n) = k_1 + k_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011(G)$$

Donde,

log: logaritmo decimal

En: Energía incidente normalizada (J/cm²)

Ia: Corriente de arco eléctrico (kA)

k_1 : -0,792 para arco eléctrico al aire libre, -0,555 para arco eléctrico en gabinete

k_2 : 0 para sistemas sin puesta a tierra, -0,113 para sistemas con puesta a tierra

G: Separación entre conductores (mm).

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(3,976) + 0,0011(153)$$

$$\log(E_n) = 0,148$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{0,148}$$

$$E_n = 1,406 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

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

Donde,

E: Energía incidente estándar (J/cm²)

Cf:: Factor de cálculo, 1 para tensiones mayores a 1kV y 1,5 menores o iguales a 1kV.

D: Distancia de trabajo (desde el posible arco hasta la persona) (mm)

t: Tiempo del arco (s)

X: Constante factor distancia x

$$E = 4,184(1)(1,406) \left(\frac{0,2}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{610^{0,973}} \right)$$

$$E = 5,883 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{5,883}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 1,405 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco eléctrico según el criterio de la IEEE 1584

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

Donde,

DB: Distancia de frontera de relámpago de arco (mm)

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

EB: Energía incidente a la distancia límite (J/cm^2), cuando la persona no tiene ningún EPP EB es igual a $5 J/cm^2$ no obstante, cuando el operario tiene algún elemento de protección personal EB es igual a la energía incidente que soporta el elemento de protección.

V: Tensión del sistema (kV)

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 1,405 \times \left(\frac{0,2}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 720,408 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,72 \text{ m}$$

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory Digsilent (Ver figura 4) se comprueba los valores de energía incidente, distancia de frontera, corriente de arco eléctrico y corriente de falla simétrica trifásica en la celda de seccionamiento hallados anteriormente analíticamente.

Figura 4.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY Digsilent en la celda de seccionamiento.

Show intermediate results							
	Accessible Location	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm^2]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category
▶ 1	- ALTA	3,976	3,920	0,200	5,798	710	1

Cómo etapa final en el procedimiento se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 2).

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Como segunda zona de riesgo de arco se identifica el transformador trifásico (Ver figura 5) que tiene como objetivo abastecer la carga completa del edificio E3T. Los datos de placa del equipo se encuentran en la tabla 20.

Figura 5.

Transformador Trifásico, subestación E3T

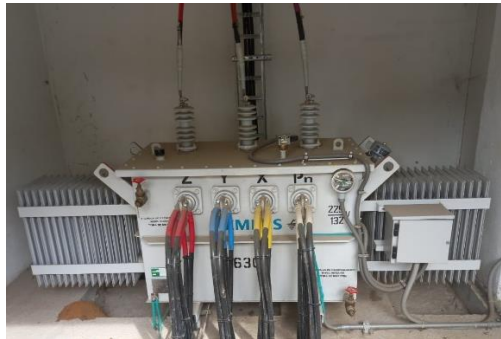


Tabla 20.

Parámetros técnicos, transformador trifásico subestación E3T

Marca: SIEMENS		Líquido aislante: Aceite Mineral			
Masa: 1703 kg		Refrigeración: ONAN	Clase de aislamiento: A		
Frecuencia: 60 Hz		Volumen de líquido: 388 L		Altura diseño: 1000 msnm	
Potencia Nominal: 630 kVA			Tensión ruptura: 27 kV	BIL AT/BT: 95 kV / 30 kV	
Fases: 3	Icc : 35,69 kA	Vcc (Uz%) : 4,45		Conexión: Dyn5	Material: Cu
DATOS NOMINALES	Devanados	Primario	Alta tensión	13200 V	27, 57 A
		Secundario	Baja tensión	229/132,2 V	1588, 34 A
Interruptor cambia taps	Taps	Actual	Tensiones		
	1		13860 V		
	2		13530 V		
	3	●	13200 V		
	4		12870 V		
	5		12540 V		

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Según el estándar de la IEEE 1584, para el cálculo de los parámetros en el transformador trifásico se tienen en cuenta el tiempo de arco de 200 ms (0.2 segundos), a una distancia mínima de trabajo del posible punto de arco a la persona de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores de 25 mm y un factor de distancia de 1,641 y una tensión de 0,22 kV.

$$I_{bf} = 29,047 \text{ kA}$$

Dónde

I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica en el transformador

Cálculo de la corriente de arco en el transformador

$$\begin{aligned} \log(I_a) &= -0,097 \\ &+ 0,662 \log(29,047) + 0,0966(0,22) + 0,000526(25) \\ &+ 0,5588(0,22)(\log(29,047)) - 0,00304(25)(\log(29,047)) \end{aligned}$$

$$\log(I_a) = 0,974$$

$$10^{\log(I_a)} = 10^{0,974}$$

$$I_a = 9,419 \text{ kA}$$

La energía incidente normalizada para el transformador:

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(9,419) + 0,0011(25)$$

$$\log(E_n) = 0,412$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{0,412}$$

$$E_n = 2,582 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

$$E = 4,184(1,5)(2,582) \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{610^{1,641}}\right)$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$E = 16,204 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{16,204}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 3,871 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco eléctrico en el transformador

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 2,582 \times \left(\frac{0,2}{0,2} \right) \left(\frac{610^{1,641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 1248,889 \text{ mm}$$

$$D_B = 1,248 \text{ m}$$

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory DIgsilent (Ver figura 6) para el transformador se comprueba los valores hallados anteriormente analíticamente.

Figura 6.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el transformador.

Show intermediate results							
	Accessible Location	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm ²]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category
▶ 1	BAJA.	29,047	9,433	0,200	16,247	1251	1

Cómo etapa final en el procedimiento de riesgo de arco eléctrico se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 3).

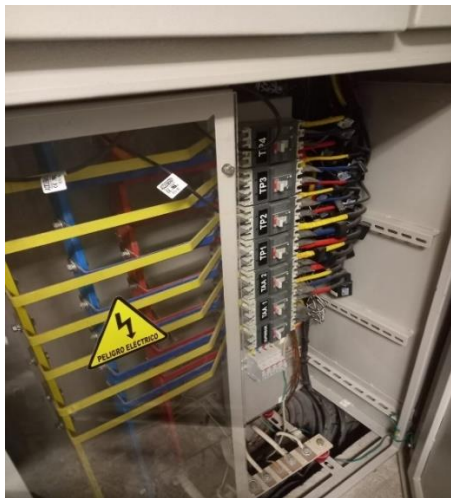
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Como tercera zona de riesgo de arco se identifica el tablero general de baja tensión

(Ver figura 7)

Figura 7.

Tablero general de baja tensión (TGBT)



Según el estándar de la IEEE 1584, para el cálculo de los parámetros en el tablero general se tienen en cuenta el tiempo de arco de 200 ms (0.2 segundos), a una distancia mínima de trabajo del posible punto de arco a la persona de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores de 25 mm y un factor de distancia de 1,641 y una tensión de 0,22 kV.

$$I_{bf} = 11,108 \text{ kA}$$

Dónde

I_{bf} : Corriente de cortocircuito en el TGBT

Cálculo de la corriente de arco TGBT

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$\log(I_a) = -0,097$$

$$+ 0,662 \log(11,108) + 0,0966(0,22) + 0,000526(25)$$

$$+ 0,5588(0,22)(\log(11,108)) - 0,00304(25)(\log(11,108))$$

$$\log(I_a) = 0,678$$

$$10^{\log(I_a)} = 10^{0,678}$$

$$I_a = 4,764 \text{ kA}$$

La energía incidente normalizada en el TGBT

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(4,764) + 0,0011(25)$$

$$\log(E_n) = 0,0924$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{0,0924}$$

$$E_n = 1,237 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

$$E = 4,184(1,5)(1,237) \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{610^{1,641}}\right)$$

$$E = 7,763 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{7,763}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 1,854 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco en el TGBT

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 1,237 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 797,577 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,797 \text{ m}$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory Digsilent (Ver figura 8) se comprueba los valores hallados anteriormente analíticamente.

Figura 8.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY Digsilent en el tablero general.

Show intermediate results							
	Accessible Location	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm ²]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category
▶ 1	BARRAJE GENERAL	11,108	4,772	0,200	7,778	798	1

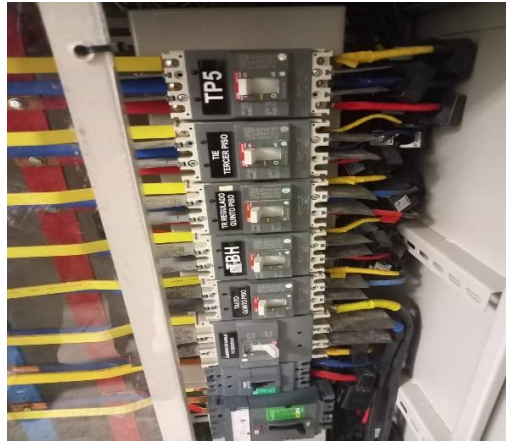
Cómo etapa final en el procedimiento de riesgo de arco eléctrico se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 4.)

Como cuarta zona de riesgo de arco se identifica el tablero de emergencia (Ver figura 9).

Figura 9.

Tablero de emergencia

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO



Según el estándar de la IEEE 1584, para el cálculo de los parámetros en el tablero de emergencia se tienen en cuenta el tiempo de arco de 200 ms (0.2 segundos), a una distancia mínima de trabajo del posible punto de arco a la persona de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores de 25 mm y un factor de distancia de 1,641 y una tensión de 0,22 kV.

$$I_{bf} = 6,167 \text{ kA}$$

Dónde

I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica en el tablero de emergencia

Cálculo de la corriente de arco en el tablero de emergencia

$$\log(I_a) = -0,097$$

$$+ 0,662 \log(6,167) + 0,0966(0,22) + 0,000526(25)$$

$$+ 0,5588(0,22)(\log(6,167)) - 0,00304(25)(\log(6,167))$$

$$\log(I_a) = 0,498$$

$$10^{\log(I_a)} = 10^{0,498}$$

$$I_a = 3,148 \text{ kA}$$

La energía incidente normalizada en el tablero de emergencia

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(3,148) + 0,0011(25)$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$\log(E_n) = -0,102$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{-0,102}$$

$$E_n = 0,791 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

$$E = 4,184(1,5)(0,791) \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{610^{1,641}}\right)$$

$$E = 4,964 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{4,964}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 1,185 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco en el tablero de emergencia

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 0,791 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 607,343 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,607 \text{ m}$$

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory Digsilent (Ver figura 10) se comprueba los valores hallados anteriormente analíticamente.

Figura 10.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY Digsilent en el tablero de emergencia.

Show intermediate results								
Accessible Location	Substation	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm ²]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category	
▶ 1 - EMERGENCIA	○ TABLERO(1)	6,167	3,144	0,200	4,954	607	0	

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Cómo etapa final en el procedimiento de riesgo de arco eléctrico se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 5.)

Como quinta zona de riesgo de arco se identifica el tablero de alimentadores (Ver figura 11)

Figura 11.

Tablero de alimentadores.



Según el estándar de la IEEE 1584, para el cálculo de los parámetros en el tablero de alimentadores se tienen en cuenta el tiempo de arco de 200 ms (0.2 segundos), a una distancia mínima de trabajo del posible punto de arco a la persona de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores de 25 mm y un factor de distancia de 1,641 y una tensión de 0,22 kV.

$$I_{bf} = 16,479 \text{ kA}$$

Dónde

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica en el tablero de alimentadores

Cálculo de la corriente de arco en el tablero de alimentadores

$$\begin{aligned}\log(I_a) &= -0,097 \\ &+ 0,662 \log(16,479) + 0,0966(0,22) + 0,000526(25) \\ &+ 0,5588(0,22)(\log(16,479)) - 0,00304(25)(\log(16,479))\end{aligned}$$

$$\log(I_a) = 0,800$$

$$10^{\log(I_a)} = 10^{0,800}$$

$$I_a = 6,309 \text{ kA}$$

La energía incidente normalizada en el tablero de alimentadores

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(6,309) + 0,0011(25)$$

$$\log(E_n) = 0,224$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{0,224}$$

$$E_n = 1,675 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

$$E = 4,184(1,5)(1,675) \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{610^{1,641}}\right)$$

$$E = 10,512 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{10,512}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 2,511 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco en el tablero de alimentadores

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 1,675 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 959,389 \text{ mm}$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$D_B = 0,959 \text{ m}$$

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory DIgsilent (Ver figura 12) se comprueba los valores hallados anteriormente analíticamente.

Figura 12.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en el tablero de alimentadores.

Show intermediate results							
Accessible Location	Substation	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm ²]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category
▶ 1 - ALIMENTADORES	○ Substation(1)	16,479	6,312	0,200	10,523	960	1

Cómo etapa final en el procedimiento de riesgo de arco eléctrico se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 6.)

Como última zona se identifica la transferencia automática (Ver figura 13) con datos técnicos característicos de fabricante (Ver tabla 20)

Figura 13.

Transferencia Automática

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO



Tabla 21.

Parámetros técnicos transferencia automática

Marca: CUMMINS Modelo: GT40800UQ72

Tensión: 110 / 190 V Corriente: 800 A

277 / 480 V Frecuencia: 60 Hz

Según el estándar de la IEEE 1584, para el cálculo de los parámetros en la transferencia automática se tienen en cuenta el tiempo de arco de 200 ms (0.2 segundos), a una distancia mínima de trabajo del posible punto de arco a la persona de 61 cm (610 mm), separación típica de conductores de 25 mm y un factor de distancia de 1,641 y una tensión de 0,22 kV.

$$I_{bf} = 9,194 \text{ kA}$$

Dónde

I_{bf} : Corriente de cortocircuito trifásica en la transferencia

Cálculo de la corriente de arco en la transferencia

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

$$\log(I_a) = -0,097$$

$$+ 0,662 \log(9,194) + 0,0966(0,22) + 0,000526(25)$$

$$+ 0,5588(0,22)(\log(9,194)) - 0,00304(25)(\log(9,194))$$

$$\log(I_a) = 0,620$$

$$10^{\log(I_a)} = 10^{0,620}$$

$$I_a = 4,168 \text{ kA}$$

La energía incidente normalizada en la transferencia

$$\log(E_n) = -0,555 - 0,113 + 1,081 \log(4,168) + 0,0011(25)$$

$$\log(E_n) = 0,032$$

$$10^{\log(E_n)} = 10^{0,032}$$

$$E_n = 1,076 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

Transformando la energía incidente normalizada en energía incidente estándar:

$$E = 4,184(1,5)(1,076) \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{610^{1,641}}\right)$$

$$E = 6,753 \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

$$E = \frac{6,753}{4,186} \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

$$E = 1,613 \text{ (cal/cm}^2\text{)}$$

La distancia de frontera de arco en la transferencia

$$D_B = \left[4,184 \times 1,5 \times 1,076 \times \left(\frac{0,2}{0,2}\right) \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}}$$

$$D_B = 732,605 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,732 \text{ m}$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Mostrándose los resultados obtenidos en Power Factory DIgsilent (Ver figura 14) se comprueba los valores hallados anteriormente analíticamente.

Tabla 22.

Resultados simulación, de análisis de arco eléctrico, mediante el Software: POWER FACTORY DIgsilent en la transferencia.

Show intermediate results							
	Accessible Location	Bolted Fault Current [kA]	Arcing Current [kA]	Arc Duration [s]	Incident Energy [J/cm ²]	Flash Boundary [mm]	PPE-Category
▶ 1	Terminal	9,194	4,173	0,200	6,729	731	1

Cómo etapa final en el procedimiento de riesgo de arco eléctrico se establece los criterios de análisis según la metodología GTC45 para realizar las recomendaciones y establecimiento del nivel de riesgo en la celda de seccionamiento según la NFPA 70E. (Ver Apéndice D. Tabla 7.)

6. Conclusiones

Gracias a la licencia obtenida por la Universidad Industrial de Santander del software Power Factory Digsilent, se pudo implementar el modelado del sistema de potencia de la subestación de uso final de la E3T, ya que es una herramienta ingenieril muy útil que permite simular distintos escenarios en cuanto al análisis de flujos de potencia, pudiéndose destacar la incorporación de paneles fotovoltaicos a la red. A su vez posee un modo para el análisis de arco eléctrico por medio de varios estándares ya incluidos en el software, por lo que fue posible comparar los resultados obtenidos en la simulación con los que se encontraron manualmente aplicando las ecuaciones descritas en el estándar.

En el análisis de riesgo de arco eléctrico en la subestación de uso final (Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones) se determinó la categoría de riesgo que pueden experimentar los equipos y operarios de la subestación ante una falla de relámpago de arco, a su vez es necesario que con el fin de disminuir aún más las magnitudes de la corriente de arco se logre realizar una correcta y efectiva coordinación de protecciones para atenuar estos valores.

Como acción de mejora, se podría realizar un marquillado o etiquetado referente a exponer la energía incidente, distancia de frontera, corriente de arco eléctrico, elementos de protección personal y categoría de riesgo en cada equipo analizado en el presente proyecto de grado con el objetivo que al momento de realizarse cualquier tipo de maniobra o mantenimiento se logre identificar la categoría de riesgo que se está exponiendo el personal.

Los resultados obtenidos mediante el software Power Factory Digsilent y los resultados obtenidos analíticamente distan levemente debido a que el software tiene un alto grado de exactitud con respecto al cálculo realizado, mientras que con la calculadora se

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

pierden varias cifras decimales de la expresión conllevando a diferencias mínimas en los resultados.

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

Referencias Bibliográficas.

- Brady (s.f). *Guía de seguridad de arco eléctrico*. Recuperado de: <https://d37iyw84027v1q.cloudfront.net/Common/Arc Flash Guidebook Latin America.pdf>.
- Bestratén, M., Orriols, R. (2004). NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos. *AMFE*. Ministerio de Trabajo y Asuntos sociales España. Recuperado de: https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_679.pdf/3f2a81e3-531c-4daa-bfc2-2abd3aaba4ba
- Caballero-Peña, J., Cadena-Zarate, C., & Osma-Pinto, G. (2020). Análisis de la operación en estado estable de una red eléctrica de baja tensión con inyección de potencia de sistemas fotovoltaicos. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 89-102.
- Diaz, H., & Fajardo, C. (2017) *Caracterización energética del edificio de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la universidad industrial de Santander aplicando la metodología del sistema de gestión integral de la energía (sgie)*. Universidad Industrial de Santander
- Gallardo, S. (2016). *Prevención de riesgos eléctricos*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Guerrero, A., Porras, A. (2006). *Riesgo Eléctrico*. Creaciones Copyright.
- ICONTEC. (2012). Guía para la identificación de peligros y valoración de Riesgos en seguridad y Salud Ocupacional GTC 45. (1ª ed.) (PDF file). Bogotá D.C. Recuperado de: http://132.255.23.82/sipnvo/normatividad/GTC_45_DE_2012.pdf
- ICONTEC. (2020). *Código Eléctrico Colombiano, NTC 2050:2020*. NTC 2050. <https://www.icontec.org/lanzamiento-codigo-electrico-colombiano-ntc-2050/>

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE ARCO

IEE (30 de noviembre de 2018). IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.

[Guía para el cálculo del riesgo de arco eléctrico]. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8563139. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8563139>.

NFPA. (2018). Standard for Electrical Safety in the Workplace. [Norma de seguridad eléctrica en el lugar de trabajo]. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70E>.

Parrado, A. (2020). *Propuesta de un esquema de evaluación de la resiliencia eléctrica de redes de baja tensión con integración de generación fotovoltaica - condición de operación en estado estable*. Universidad Industrial de Santander

Ramírez Cano, F., & Rivas Paternina, F. A. (2011). Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestación de transmisión de energía. *Revista CIER*, 13. [http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/65dc1a0b0b6949078325792d0045a828/\\$FILE/07_MetodologiaParaElDiagnostico.pdf](http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/65dc1a0b0b6949078325792d0045a828/$FILE/07_MetodologiaParaElDiagnostico.pdf)

Resolución 90708 de 2013. [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctrica–RETIE. (30 de agosto de 2014)

Resolución 5018 de 2019 [Ministerio del Trabajo]. 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. (20 de noviembre de 2019).