



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales No Renovables

Maestría en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Riesgos del arco eléctrico en el sistema de puesta a tierra de subestaciones eléctricas

Trabajo de Investigación previa a la obtención del título de Magíster en Electricidad. Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

AUTOR:

Ing. Jackson Francisco Flores Carpio.

DIRECTOR:

Ing. Franklin Jiménez Peralta, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 26 de enero de 2023

Ing. Franklin Jiménez Peralta, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

Que hemos revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Riesgos del arco eléctrico en el sistema de puesta a tierra de subestaciones eléctricas**, previo a la obtención del título de **Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, de la autoría del estudiante **Jackson Francisco Flores Carpio**, con **cedula de identidad N° 1900391853**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Franklin Jiménez Peralta, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, Jackson Francisco Flores Carpio, declaro ser autor del Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Autor: Jackson Francisco Flores Carpio.

Cédula de Identidad: 1900391853

Fecha: 30/01/2023

Correo electrónico: jackson.flores@unl.edu.ec

Teléfono: 0998517293

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, Jackson Flores Carpio, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Riesgos del arco eléctrico en el sistema de puesta a tierra de subestaciones eléctricas,** como requisito para optar el título de **Magíster en Electricidad. Mención Sistemas Eléctricos de Potencia,** autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de investigación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los treinta días del mes de enero del dos mil veintitrés.

Firma:

Autor: Jackson Flores Carpio.

Cédula: 1900391853

Dirección: Armenia y París

Correo electrónico: jackson.flores@unl.edu.ec

Teléfono: 0998517293

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Franklin Jiménez Peralta, Mg. Sc.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia quienes son un apoyo incondicional, principalmente a mis padres que siempre me dan su apoyo y consejo ante cada meta que tengo en frente, a mi hermana que a pesar de la distancia me alienta a seguir adelante y me brinda su apoyo.

Jackson Francisco Flores Carpio.

Agradecimiento

Un sincero agradecimiento a todos los docentes que impartieron sus conocimientos en la maestría, a los compañeros que me brindaron su ayuda cuando se las solicite, también a los colegas que estuvieron en las buenas y en las malas y finalmente pero no menos importante a los tutores y docentes, gracias por ayudarme y guiarme en el desarrollo de este trabajo, especialmente a Miriam Lucero quien me brindo su ayuda en este proceso.

JACKSON FRANCISCO FLORES CARPIO.

Índice de contenidos

| | |
|---|------------|
| Portada | i |
| Certificación | ii |
| Autoría | iii |
| Carta de autorización. | iv |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento | vi |
| Índice de contenidos | vii |
| Índice de tablas:..... | viii |
| Índice de figuras:..... | ix |
| Índice de Anexos:..... | ix |
| 1. Título | 1 |
| 2. Resumen | 2 |
| 2.1 Abstract | 3 |
| 3. Introducción | 4 |
| 4. Marco teórico | 6 |
| 4.1 Principales elementos que conforman una subestación eléctrica | 6 |
| 4.1.1 Patio de 69Kv..... | 7 |
| 4.1.2 Patio de 13.8 kV..... | 9 |
| 4.1.3 Mallado de Puesta a Tierra. | 11 |
| 4.2 Normativa para el análisis de riesgos eléctricos en subestaciones. | 11 |
| 4.3 Reglamento de seguridad del trabajo contra riesgos en instalaciones de energía eléctrica..... | 13 |
| 4.4 Peligros y riesgos en una subestación eléctrica. | 14 |
| 5. Metodología | 16 |
| 6. Resultados | 21 |
| 7. Discusión | 22 |
| 8. Conclusiones | 23 |
| 9. Recomendaciones | 24 |
| 10. Bibliografía | 25 |
| 11. Anexos. | 26 |

Índice de tablas:

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1. | Clases de equipamiento y distancias de trabajo..... | 12 |
| Tabla 2. | Categorías de EPP | 18 |
| Tabla 3. | Distancias de seguridad. | 19 |

Índice de figuras:

Figura 1. Diagrama unifilar de subestación de distribución. 6

Figura 2. Diagrama de Seguridad Eléctrica. 20

Índice de Anexos:

Anexo 1. Certificación de traducción del resumen

1. Título

Riesgos del arco eléctrico en el sistema de puesta a tierra de subestaciones eléctricas

2. Resumen

Toda persona que realiza un trabajo utilizando equipos o líneas energizados se enfrenta a un peligro latente que se encuentra permanentemente presente durante el desarrollo de sus actividades. El arco eléctrico es uno de estos peligros y objeto de análisis en el presente trabajo de investigación. El arco eléctrico puede causar lesiones graves a una persona incluso sin haber hecho contacto con las partes energizadas del equipo. Se analiza la corriente incidente, corriente de paso y corriente de contacto, así como las distancias de seguridad y categorías de equipos de protección personal según las normas NFPA 70E, IEEE 1584 e IEEE 80.

Palabras claves:

Arco eléctrico, estándares de seguridad eléctrica, NFPA, riesgos eléctricos.

2.1 Abstract

Every person who performs work using energized equipment or energized lines is faced with a latent danger that is permanently present during the development of their activities. The electric arc is one of these dangers, and the object of analysis in the present research work. The arc-flash can cause serious injuries to a person even without having contacted energized parts of the equipment. The incident current, step currents and touch current are analyzed, as well as the safety distances and categories of personal protection equipment according to the NFPA 70E, IEEE 1584, and IEEE 80 standards.

Keywords:

Arc-flash, security electric standards, NFPA, electric hazard.

3. Introducción

La distribución eléctrica es uno de los principales pilares para el desarrollo de la sociedad, esto se debe a que la electricidad paso a ser un servicio básico de la sociedad, por ello actualmente se tiene una dependencia al servicio eléctrico creando así una menor tolerancia para cualquier corte de energía eléctrica. Debido a esta dependencia que se ha generado al servicio eléctrico, el personal del sector eléctrico se ve en la necesidad de realizar trabajos con líneas y equipos energizados, esto expone a riesgos de forma permanente al personal, siendo el más común el contacto eléctrico, aunque un riesgo menos visible que puede producir graves lesiones inclusive la muerte es el arco eléctrico, este puede ocurrir sin necesidad de contacto eléctrico. Recientemente se considera como un riesgo el arco eléctrico ya que anteriormente los accidentes eléctricos eran relacionados directamente con el contacto eléctrico.

Este proyecto se desarrolla con la finalidad evaluar el riesgo de arco eléctrico en una subestación eléctrica considerando las recomendaciones expuestas en el estándar IEEE 80, IEEE 1584, NFPA 70E y de esta manera proponer una forma de mitigar el riesgo de arco eléctrico mediante la correcta selección de protecciones y elementos de seguridad personal.

El nivel de riesgo se determina a partir del cálculo de la energía incidente, esta depende principalmente de dos valores, uno de ellos es la corriente de cortocircuito y el otro es el tiempo de despeje de falla.

En el presente trabajo se analiza un método de determinación de la energía incidente y las fronteras para determinar el equipo de protección adecuado, y mitigar el riesgo.

Objetivos

Objetivo General

Determinar las medidas mínimas de seguridad necesarias para las personas que laboran en las subestaciones, con equipos activos y líneas energizadas.

Objetivos Específicos

- ✓ Establecer el nivel de riesgo debido al arco eléctrico al que se encuentran expuestas las personas.
- ✓ Definir alternativas para disminuir en lo posible el riesgo eléctrico.
- ✓ Detallar recomendaciones sobre las protecciones a utilizar frente al contacto con un arco eléctrico.

4. Marco teórico

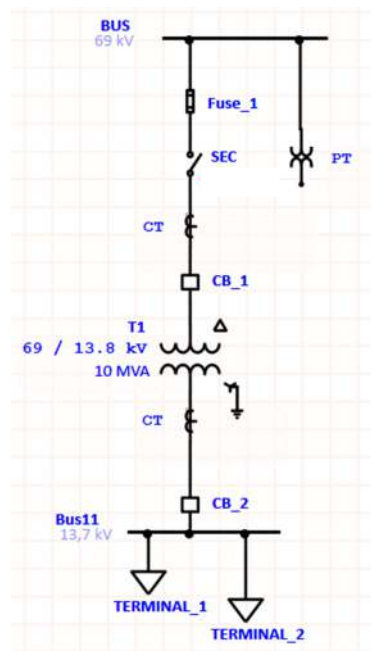
El consumo eléctrico masivo se realiza en corriente alterna y el principal inconveniente que enfrenta esta es que debe ser generada de forma constante, no puede ser almacenada. Por esto es necesario contar con un sistema eléctrico en el cual se disponga de regulación y automatización.

Una subestación es la representación de un nodo en el sistema eléctrico de potencia, estas subestaciones sirven de enlace dentro del sistema eléctrico de potencia y son diseñadas en base a los requerimientos de cada zona donde son implementadas, en las mismas se lleva a cabo la etapa de transformación llevando las magnitudes a niveles adecuados para la red eléctrica ya sea a nivel de transporte, distribución o consumo, estos niveles de voltaje deben cumplir con los respectivos estándares de calidad y seguridad (Villegas, 2003).

4.1 Principales elementos que conforman una subestación eléctrica

Las subestaciones regularmente se considera que están conformadas de cinco partes, patio de 69 kV, transformador de potencia, patio de 13.8 kV, cuarto de control y malla de puesta a tierra, las cuales están conformadas por distintos elementos y se describen a continuación:

Figura 1. Diagrama unifilar de subestación de distribución.



Fuente: Autor.

4.1.1 Patio de 69Kv

4.1.1.1 Estructuras.

Las estructuras del pórtico son torres las cuales tienen un altura y separación determinadas, para el presente caso se considerará una altura de 10.58 m y una separación de 6 m, estas torres están unidas con bandejas horizontales para soporte del seccionador de 69 kV, aisladores, pararrayos y portafusibles.

4.1.1.2 Aisladores y Herrajes.

Dentro de los herrajes y aisladores empleados para el caso particular se emplean 3 aisladores de 69 kV para poste, 3 aisladores de retención para 69 kV, 3 grapas terminales y 12 terminales tipo talón.

4.1.1.3 Seccionadores.

Dentro de las líneas eléctricas los seccionadores pueden desempeñar distintas funciones, siendo comúnmente empleados para el seccionamiento de circuitos por necesidad de operación, o para aislar componentes en los cuales se intervendrá, estos seccionadores abiertos deberán contar con una resistencia en las terminales a los esfuerzos eléctricos en tal forma que el personal de campo pueda laborar de forma segura (Villegas, 2003).

4.1.1.4 Interruptor.

Los interruptores automáticos son dispositivos mecánicos de interrupción capaces de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como de conducir durante un tiempo especificado, interrumpir y establecer corriente en condiciones normales como son las de cortocircuito. Su función básica es conectar y desconectar de un sistema o circuito energizado líneas de transmisión, transformadores, reactores o barrajes (Villegas, 2003).

4.1.1.5 Pararrayos.

En las subestaciones los pararrayos son empleados para protección de los equipos, protegiendo el equipamiento contra sobretensiones.

Para el patio de alta tensión se emplea tres pararrayos tipo COOPER, de 32 kA.

4.1.1.6 Conductores.

Los conductores empleados serán tipo de cobre desnudo 4/0 AWG tanto para el patio de 69 kV como para la puesta a tierra, para el patio de 69 kV se empleará una longitud de 40 m y para el aterramiento se empleará una longitud de 25 m.

4.1.1.7 Transformador de Potencia.

Los transformadores de potencia o transformadores de distribución son importantes en una red de distribución del sistema eléctrico de potencia. Estos son clasificados de acuerdo con sus características:

El transformador de potencia es usado en redes de transmisión de altos voltajes, pueden ser elevadores o para disminuir el voltaje.

El transformador de distribución es aquel que suministra el servicio eléctrico en su última etapa de transformación, en esta etapa se reduce el voltaje a nivel de usuario para permitir la conectividad del cliente al servicio eléctrico. Los transformadores de distribución comúnmente utilizados son de dos tipos, transformador de poste y transformador de pedestal.

4.1.1.7.1 Pararrayos en el lado de alta del Transformador.

El transformador de potencia cuenta con sistema independiente de pararrayos, en alta tensión posee tres pararrayos de 65 kA y un voltaje nominal de 60 kV, siendo ubicados individualmente en cada una de sus fases.

4.1.1.7.2 Pararrayos en el lado de baja tensión del transformador.

El transformador de potencia cuenta con sistema independiente de pararrayos en su parte de baja tensión, contando este con tres pararrayos los mismos que tienen una corriente de 65 kA y un voltaje nominal de 10 kV, siendo ubicados individualmente en cada una de sus fases.

4.1.2 Patio de 13.8 kV.

4.1.2.1 Estructuras.

Las estructuras en la parte de baja se constituyen por 3 pórticos de 7.2 m de altura, en los pórticos se cuenta con soportes para cuatro niveles de barra, tres seccionadores de interconexión, un seccionador principal, 4 alimentadores y un banco de capacitores.

4.1.2.2 Aisladores y Herraes.

Se cuenta con aisladores de suspensión de 15 kV, caja de fusibles de 100 A y 15 kV, grapas de línea viva, grapas terminales de 500 y 1000 MCM, grilletes tipo T de 500 y 1000 MCM, pernos de ojo 5/8", terminales tipo talón de 4/0, 250 MCM y 500 MCM.

4.1.2.3 Seccionador principal.

El seccionador de aire es el dispositivo encargado de establecer las conexiones siendo este un seccionador tripolar de tipo EAB, con una capacidad máxima de 15 kV y un BIL de 110 kV, su corriente continua es de 1.2 kA y su corriente instantánea es de 61 kA.

4.1.2.4 Reconectores.

Son equipos empleados para la apertura y cierre de alimentadores en forma automática, los cuales pueden ser reconectores de tipo VWE con aislamiento al vacío, voltaje máximo de 14.4 kV, un BIL de 110 kV, corriente continua de 560 A y corriente de interrupción máxima de 12 kA.

4.1.2.5 Cuchillas seccionadoras.

También conocidas como separadoras o desconectores, son empleadas para conectar o desconectar diversas partes de una red eléctrica, estas son empleadas para poder efectuar maniobras tanto de operación como de mantenimiento.

4.1.2.6 Seccionadores de interconexión

Al igual que los seccionadores de línea estos dispositivos cumplen una función fundamental ya que permiten hacer el seccionamiento de alimentadores.

4.1.2.7 Conductores.

Los conductores empleados serán tipo de cobre desnudo 1000 MCM con una longitud de 78 m en la barra principal, en la barra de transferencia se empleará un conductor de cobre desnudo de 500 MCM con una distancia de 56 m, en las cuchillas de reconexión se emplea un conductor aislado de 500 MCM y una longitud de 25 m, para el aterrizaje se utiliza un conductor de cobre desnudo de calibre 4/0 AWG con una longitud de 20 m.

4.1.2.8 Transformador de corriente

Los transformadores de corriente o TC, tiene como función principal la medición de corrientes en el sistema eléctrico, cuenta con un devanado primario conectado en serie con el circuito de alta tensión. El TC tiene una impedancia despreciable vista desde el devanado primario, aun teniendo en cuenta la carga que se conecta en el secundario. De esta manera la corriente que circula en el primario de los TC es definida por el circuito de potencia (Villegas, 2003).

4.1.2.9 Transformador de tensión

En redes sobre los 600 V normalmente no se hacen mediciones de tensión directamente en la red primaria sino a través de los transformadores de tensión o TP, estos cumplen las siguientes funciones (Villegas, 2003):

- Aislar el circuito de baja del circuito de alta tensión

- Procurar reproducir fielmente en el lado de baja tensión los efectos transitorios y de régimen permanente que se aplican en el lado de alta tensión.

Los TP pueden ser de varios tipos, entre ellos: inductivos, divisores capacitivos, divisores resistivos, divisores mixtos o capacitivo resistivo.

4.1.3 Mallado de Puesta a Tierra.

En la actualidad la expansión del territorio poblacional ha representado el incremento en la demanda energética por ende se deriva en el incremento de subestaciones de distribución, las cuales deben ser correctamente aterrizadas para garantizar un balance entre funcionamiento y seguridad, garantizando así el cumplimiento con la norma IEEE80.2013, de esta manera se garantiza la seguridad del personal y un funcionamiento fiable (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

4.2 Normativa para el análisis de riesgos eléctricos en subestaciones.

NFPA 70 es la normativa que determina los procesos de seguridad en el área eléctrica para el desarrollo de actividades en sitios con riesgo eléctrico. Permitiendo conocer los distintos niveles de protección y delimitar las zonas donde se debe emplear y aplicar cada nivel de seguridad, permitiendo así disminuir los riesgos eléctricos (Hartwell et al., 2017).

Se determina los niveles de riesgo eléctrico en base a dos factores, la corriente de falla y el tiempo de despeje de la corriente de falla, obteniendo así la corriente incidente, para ello se empleará software especializado en este tipo de procesos.

La NFPA 70 se basa en proponer un sitio seguro para el trabajador en relación con los riesgos que se derivan del trabajo con el área eléctrica. Esta normativa cubre áreas como la instalación de equipamiento y conductor, así como la remoción de los mismos, también está orientado a identificación y canalización de los servicios (Hartwell et al., 2017).

Para el estudio de arco eléctrico es necesario el analizar las variables del sistema (Rubbo et al., 2020), tales como:

- Niveles de tensión y corriente
- Potencia de cortocircuito

- Distancia de trabajo
- Distancia del operario a la fuente de arco eléctrico (distancia a la cual no sufre quemaduras de segundo grado)
- Duración de la falla

Las protecciones de arco eléctrico se basan sobre la corriente incidente que tienen las personas sobre su torso y cabeza, mas no sobre corrientes incidentes sobre sus brazos y manos. La normativa IEEE 1584 proporciona la información que se expone en la Tabla 1, en la cual se muestra las distancias de trabajo basada en el equipamiento (“IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations - Redline,” 2018).

Tabla 1. Clases de equipamiento y distancias de trabajo

| Clases de equipamiento y distancias típicas de trabajo. | | |
|--|------------------------------|-----------------|
| Clases de Equipamiento | Distancias de Trabajo | |
| | mm | Pulgadas |
| <i>15 kV Switchgear</i> | 914.4 | 36 |
| <i>15 kV MCC</i> | 914.4 | 36 |
| <i>5 kV Switchgear</i> | 914.4 | 36 |
| <i>5 kV MCC</i> | 914.4 | 36 |
| <i>Low-voltage switchgear</i> | 609.6 | 24 |
| <i>Shallow low-voltage MCCs and panelboards</i> | 457.2 | 18 |
| <i>Deep low-voltage MCCs and panelboards</i> | 457.2 | 18 |
| <i>Cable junction box</i> | 457.2 | 18 |

Uno de los efectos que produce el paso de corriente por el cuerpo humano depende de la magnitud, duración y frecuencia de la corriente. La consecuencia más peligrosa de dicho efecto es la condición conocida como fibrilación ventricular, esto resulta en la detención del flujo sanguíneo (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

La frecuencia es una variable muy peligrosa al momento de haber un flujo de corriente por el cuerpo humano, una magnitud de 0.1 amperios puede ser letal para el cuerpo humano a una frecuencia de 50 o 60 Hz (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

A un amperaje de 0.1 A se lo considera como umbral percepción, la corriente desde 1 a 6 mA, denominadas corrientes de escape, generalmente no afecta la capacidad de las personas para sostener un objeto energizado, para controlar sus músculos y soltarlo. En base al experimento

clásico de Dalziel se obtiene que en las mujeres hay un umbral de soltar a los 10.5 mA, mientras en los hombres es de 16 mA, de 6 a 9 mA como valores umbral de respectivos (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

En el rango de 9 a 25 mA el tener contacto con un objeto energizado puede ser doloroso y a su vez dificultar soltar el objeto sujetado. A menos que se haya expuesto a prolongados tiempos lo cual genera la parálisis de la respiración, a pesar de ello suelen responder favorablemente a la reanimación.

De 60 a 100 mA se pueden presentar daños graves a la salud del afectado, esto debido a que pueden presentarse daños cardiacos o inclusive la muerte.

Por estas razones es muy importante el manejo de los valores de umbral, ya que estos permitirán hacer un diseño de puesta a tierra acorde a las condiciones y ayudarán a mantener los valores de corriente por debajo de los valores de umbral (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

Por ello la magnitud de corriente y la duración de flujo de esta por el cuerpo humano a 50 o 60 Hz debe ser menor a la corriente que causa fibrilación ventricular.

Con lo expuesto anteriormente se considera el voltaje de paso y voltaje de toque, donde:

El voltaje de paso: es el voltaje de superficie que experimenta una persona al estar con los pies separados a 1m de distancia sin tocar ningún otro objeto de su entorno.

Voltaje de toque: es la diferencia de potencia entre el punto donde se encuentra de pie la persona y el punto donde toca con la mano la persona en sitio. Se puede considerar como circuito abierto si se obvia la resistencia equivalente del cuerpo humano y como circuito cerrado al tomar en cuenta la misma (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” 2015).

4.3 Reglamento de seguridad del trabajo contra riesgos en instalaciones de energía eléctrica.

El arco eléctrico en su mayoría se produce al momento que un operador hace en contacto con un elemento energizado con algún material conductor, normalmente esto ocurre al realizar pruebas o realizar algún mantenimiento preventivo. El arco eléctrico al ser corrientes elevadas generalmente, genera un gran campo eléctrico, a medida que se mueve las partes conductoras y

estas se mueven la corriente sigue fluyendo, esto generalmente produce gases y altas temperaturas que pueden generar quemaduras y encender la vestimenta del personal a una distancia significativa del punto de falla (“IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations - Redline,” 2018). El uso de los distintos elementos de protección personal (EPP) está directamente relacionados a los niveles de tensión según su energía incidente, y a su vez se relacionan directamente con la distancia de trabajo, esto permite determinar el nivel de EPP que se deben emplear en cada una de las secciones de un patio de subestación.

4.4 Peligros y riesgos en una subestación eléctrica.

En una subestación se encuentran peligros latentes tanto de electrocución como de arco eléctrico, el análisis de una descarga eléctrica al cuerpo humano dentro de la subestación se lo puede realizar mediante el voltaje de toque y paso, analizados en la sección previa, mientras que el arco eléctrico siendo un peligro menos visible y que es capaz de producir graves daños a la salud y la seguridad del personal, este es un fenómeno que no necesita que el personal este en contacto con las estructuras o equipos del patio de una subestación (Rodríguez Suesca, 2018).

Para el presente trabajo se realizará el análisis del fenómeno de arco eléctrico, este fenómeno es comúnmente el resultado del flujo eléctrico a través de un aislante, en el caso de un seccionador se presentaría al romper la barrera de aislamiento que presenta el aire, esto hace que se ionice el aire lo cual genera plasma.

El arco eléctrico presenta riesgos altamente peligrosos para la salud del personal, teniendo consecuencias graves al realizarse una explosión de arco, estas pueden ser de distintos ámbitos, como por ejemplo (Ramírez Cano & Rivas Paternina, 2011):

Calor: las altas temperaturas que se generan por la ionización del medio pueden alcanzar distancias de hasta 3 m generando quemaduras graves o inclusive la muerte.

Presión: también conocida como arc blast, al generarse un arco eléctrico también se genera una presión que puede alcanzar las 30 T/m², presión suficiente para despedir a una persona por varios metros o desprender objetos que se encuentran cerca al punto donde se genera la presión por arco eléctrico.

Objetos: al realizarse una explosión por presión todo objeto cercano puede ser despedido siendo considerados proyectiles que pueden afectar la seguridad del personal

Sonido: el sonido por la explosión puede alcanzar los 140 dB, una persona puede soportar hasta 85 dB con exposiciones cortas, al ser superior a este valor se pueden producir daños graves al sistema auditivo.

Productos tóxicos: La liberación de partículas y humo que se generan producto del arco eléctrico representan un peligro ya que normalmente suelen ser gases nocivos.

Radiación Ultravioleta: El arco eléctrico genera no solamente luz brillante, sino también rayos ultravioletas e infrarrojos, estos últimos pueden causar quemaduras graves a la piel y ojos del personal.

5. Metodología

Se realiza un análisis de los estándares de riesgo eléctrico, en base a los cuales se procederá a determinar los diferentes riesgos eléctricos y el método de cálculo de energía incidente mediante lo cual se obtendrá el nivel de riesgo de arco eléctrico dentro de una subestación eléctrica.

El estándar IEEE 1584 está directamente relacionado con los problemas de arco eléctrico dentro de una subestación, en dicho estándar se encuentra el método de cálculo de arco eléctrico mediante la energía incidente. En la norma NFPA 70 se puede obtener información acerca del cálculo de energía incidente donde se analiza también en base al cuerpo humano, para ello se considera dos tipos de cuerpo, uno de 50 kg y otro de 70 kg. En el estándar IEEE 80 que es el correspondiente a sistemas de puesta a tierra se encuentra la relación corporal respecto a la seguridad del personal, esto debido a que se liga directamente con los voltajes de toque y de paso que pueden ocasionar daños al personal dentro de una subestación.

En el presente trabajo se lleva a cabo un análisis de los riesgos eléctricos en base a corrientes incidentes las cuales son calculadas en base a la NFPA 70, permitiendo así proponer soluciones para la mitigación de riesgos y proponer los distintos niveles de seguridad para realizar trabajos en equipos y líneas energizadas, aplicando únicamente el criterio técnico.

El análisis de arco eléctrico se realiza en base a la corriente incidente para lo cual se debe emplear las formula descritas de la Ec: 1 a 3:

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2.1} (V_{OC} - 2.7) + E_{2700} \quad Ec: 1$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11.6} (V_{OC} - 14.3) + E_{14300} \quad Ec: 2$$

$$E_3 = \frac{E_1(2.7 - V_{OC})}{2.1} + \frac{E_2(V_{OC} - 0.6)}{2.1} \quad Ec: 3$$

Donde:

E_1 es el primer termino E de interpolación entre 600V y 2700 V (J/cm^2)

E_2 es el segundo termino E de interpolación usado cuando V_{oc} is mayor que 600V y 2700 V (J/cm^2)

E_3 es el tercer termino E de interpolación usado cuando V_{oc} is menor que 600V y 2700 V (J/cm^2)

Para conocer la duración de flujo de corriente por el cuerpo humano está relacionada con la magnitud, para ello se debe considerar la Ec: 4.

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad Ec: 4$$

Cabe recalcar que el valor constante varía de acuerdo con el peso corporal, por ello el estándar IEEE 80 proponer realizar el análisis para un cuerpo de 50 Kg empleando la Ec: 4, y emplear la ecuación Ec: 5 para una persona de 70 Kg.

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec: 5}$$

La seguridad del personal en una subestación según el estándar IEEE 80 no debe superar los límites críticos que puede superar el cuerpo humano ante una falla, corto circuito accidental o desenergización de la línea, para evitar que el voltaje máximo supere los límites críticos ante cualquier accidente se emplea las ecuaciones Ec: 6 a 8. Para el voltaje de paso:

$$E_{step} = (R_B + 2R_f)I_B \quad \text{Ec: 6}$$

Para un cuerpo de 50 kg.

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec: 7}$$

Para un cuerpo de 70 kg.

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec: 8}$$

De igual manera para el voltaje de toque se emplearán las ecuaciones Ec: 9 a 11.

$$E_{step} = (R_B + \frac{R_f}{2})I_B \quad \text{Ec: 9}$$

Para un cuerpo de 50 kg.

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s * \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec: 10}$$

Para un cuerpo de 70 kg.

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s * \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec: 11}$$

Según el estándar IEEE 1584 el análisis de la energía incidente debe ser dividido en dos niveles de voltaje, los cuales están sujetos a los rangos de voltaje de circuito abierto del sistema, los cuales se muestran a continuación:

- 601 V a 15000 V: 200 A a 65000 A

- 208 V a 600 V: 500 A a 106000 A

Dichos rangos siempre se deben cumplir, esto se debe a que dichos rangos aplican para el dimensionamiento del recinto de trabajo.

El arco eléctrico se compone de dos etapas, primero se genera el relámpago eléctrico que es la liberación de energía generando altas temperaturas, mientras que su segunda etapa es una ráfaga de arco, en esta etapa es donde se liberan las partículas que son desprendidas por la falla.

En la tabla 2 se muestra los niveles de energía y las categorías con las cuales se determinan los distintos EPP para realizar los trabajos en equipos energizados, cabe destacar que a pesar de estas indicaciones la protección mínima para el personal es la vestimenta de algodón con protección ignífuga.

Tabla 2. Categorías de EPP

| Categoría y ejemplos de EPP | | | |
|-----------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Categoría | Nivel de energía (cal/cm ²) | Nivel de energía (J/cm ²) | Ejemplos típicos De EPP |
| 0 | < 2 | < 8.4 | Algodón no tratado, lana, rayón |
| 1 | 5 | 21 | Camisa y pantalón retardante al fuego |
| 2 | 8 | 34 | Ropa interior de algodón más camisa y pantalón retardante al fuego. |
| 3 | 25 | 105 | Ropa interior de algodón más camisa y pantalón retardante al fuego más overol retardante al fuego |
| 4 | 40 | 168 | Ropa interior de algodón más camisa y pantalón retardante al fuego más vestido de arco multicapas (3 o más) |

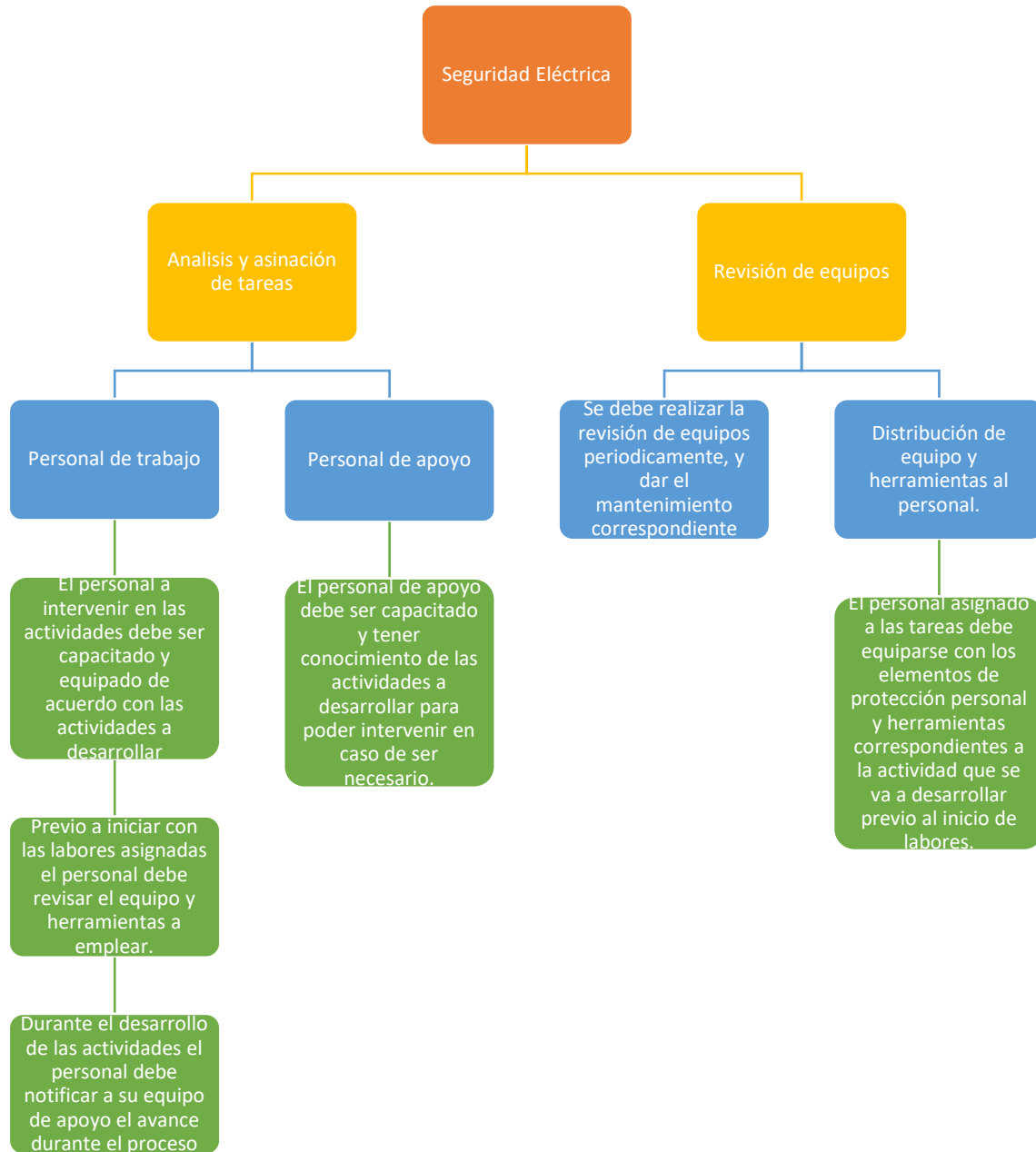
Para la seguridad laboral se debe respetar las distintas fronteras de limitación para los trabajos a realizar, las cuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Distancias de seguridad.

| Distancias de Seguridad | |
|--------------------------------------|---|
| Frontera | Descripción |
| Frontera de límite de aproximación | <i>Área limitada o confinada. Es el límite el cual no debe ser rebasado por personal no calificado</i> |
| Frontera de aproximación restringida | <i>Límite restringido de acercamiento. Es el límite que puede pasar únicamente personal calificado utilizando su equipo de protección</i> |
| Frontera de protección contra arco | <i>Límite de protección por arco. Distancia en la cual la energía incidente es igual a 1.2 cal/cm² para la interrupción de la falla menor a 0.1 s.</i> |
| Energía Incidente | <i>Energía incidente. La energía que se libera por el arco debido al entrar en contacto con una parte energizada.</i> |
| Corriente de falla franca | <i>Falla franca. Corriente de corto circuito entre diferentes conductores en el que la impedancia en el punto de falla es prácticamente cero</i> |
| Corriente de falla de arco | <i>Falla por arco. Es el flujo de corriente a través del aire este tiene una impedancia mayor que un metal. El arco produce o emana calor que puede llegar a 35000 C.</i> |
| Personal Calificado | <i>Es la persona que ha recibido el entrenamiento en el equipo y la capacidad de distinguir los riesgos potenciales en las diferentes partes del equipo</i> |
| Riesgo de destello | <i>Riesgo de explosión o destello por cortocircuito</i> |

De acuerdo con lo analizado en base a las distintas normativas internacionales ofrecidas tanto por IEEE como por la NFPA se ha desarrollado un diagrama (Véase Figura 2), donde se propone algunos pasos a seguir para cuidar la seguridad laboral, disminuir el riesgo eléctrico y mejorar las condiciones laborales de quienes trabajan principalmente en patios de subestación y líneas energizadas.

Figura 2. Diagrama de Seguridad Eléctrica.



Fuente: Autor.

6. Resultados

Al ser un método de análisis para la conservación de la integridad del personal y equipos dentro de una planta eléctrica de generación o distribución es necesario la implementación y conocer los distintos niveles de protección que se debe emplear, considerando que el estudio de arco eléctrico es destinado a analizar todos los puntos de posible falla dentro de las plantas y a todo nivel de voltaje.

Mediante el análisis de literatura técnica sobre el arco eléctrico se pueden identificar los niveles de cortocircuito e impedancias en todos los niveles de voltaje, las distancias de arco eléctrico, también se debe conocer las distancias seguras de trabajo, clase de vestimenta apropiada (EPP), cantidad de energía disipada, diseño de etiquetas según la NFPA 70E, la configuración inicial de las protecciones para poder realizar los reajustes en las protecciones respecto a los tiempos de falla.

El arco eléctrico es una falla eléctrica que está relacionada principalmente con la coordinación de protecciones, por lo tanto, un estudio de arco eléctrico debe realizarse con la coordinación de protecciones establecida, que permita realizar ajustes necesarios en las protecciones y así disminuir la probabilidad de generar una falla de arco eléctrico.

El determinar el perímetro del arco eléctrico permitirá conocer cuál es la distancia segura para que el personal esté fuera del alcance de la falla.

7. Discusión

Para el análisis de arco eléctrico no es necesario únicamente conocer el tiempo de despeje de falla, sino también la corriente de cortocircuito, el cálculo de arco eléctrico es una herramienta más para la coordinación de protecciones ya que este sirve para dar selectividad a una protección, sin embargo, el análisis del arco eléctrico es un análisis de seguridad.

Al ser un análisis de seguridad, permitirá hacer un reajuste de selectividad en las protecciones, se puede comprometer la selectividad de las protecciones obteniendo mejores resultados en el nivel de energía incidente.

El arco eléctrico es uno de los principales causantes de accidentes eléctricos, por esta razón las empresas distribuidoras deben realizar un análisis de arco eléctrico en sus instalaciones y deben dotar de las protecciones necesarias a su personal.

Desde el punto de vista de seguridad industrial todo personal que realice actividades con líneas o equipos energizados deben contar con los elementos de protección personal adecuados al trabajo que están realizando, un arco eléctrico no únicamente genera una descarga eléctrica sino también una explosión.

8. Conclusiones

De forma general se puede determinar que, si bien en una subestación se realiza la coordinación de protecciones acorde a los requerimientos de los equipos y estándares, es necesario el realizar un análisis de arco eléctrico.

Es necesario considerar los reajustes en las protecciones, para poder lograr los niveles de seguridad necesarios para evitar arcos eléctricos y cumplir con las categorías de arco eléctrico.

Todo personal que se encuentre cerca al área de trabajo energizado debe contar con los elementos de protección necesarios para dicha actividad.

En el caso de personal que realice maniobras debe mantener todo su equipamiento siempre, sea que estén con los equipos energizados o no energizados.

El realizar un reajuste en las protecciones con un estudio de arco eléctrico permitirá incrementar la seguridad de trabajo y disminuir el riesgo de arco eléctrico.

9. Recomendaciones

Para minimizar el riesgo y la ocurrencia de arco eléctrico en las instalaciones se puede optar por las siguientes medidas:

1. Instruir y capacitar al personal sobre los distintos riesgos a los cuales se exponen en una instalación eléctrica.
2. Capacitar al personal sobre cada una de las etiquetas y riesgos que estas muestran.
3. Implementar la regla de uso del equipo de protección correspondiente a cada una de las áreas.
4. Realizar ensayos periódicos a las protecciones e interruptores, esto permitiría verificar el correcto funcionamiento y tiempos de operación.
5. Modernizar los equipos de protecciones, con ello se logrará mejorar los tiempos de actuación con lo cual se incrementa la seguridad en las instalaciones.
6. Implementar relés de arco eléctrico, estos dispositivos pueden detectar el arco eléctrico, permiten reducir la energía del arco eléctrico lo cual permite despejar la corriente que alimenta la falla, los detectores ópticos permiten disminuir el tiempo de despeje de la falla a prácticamente el tiempo de apertura del interruptor.
7. Implementar fusibles limitadores de corriente: estos dispositivos están diseñados para operar extremadamente rápido de acuerdo con los niveles de corriente. Estos dispositivos se han convertido en partes integrales en algunas instalaciones por las características de funcionamiento.
8. Implementar mediciones que garanticen el nivel de aislamiento para todo el equipamiento (herramientas y EPP) del personal que labora en operación y mantenimiento de redes eléctricas
9. La más importante y quizá la más fiable de las estrategias es el desenergizar las líneas o instalaciones eléctricas donde se está trabajando, de ser posible se debe realizar siempre esta acción, el desenergizar ayuda a protegerse de los peligros de arco eléctrico.

10. Bibliografía

- Hartwell, F. P., McPartland, J. F., & McPartland, B. J. (2017). *McGraw-Hill's National Electrical Code 2017 Handbook*. McGraw-Hill Education.
- IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations - Redline. (2018). In *IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002) - Redline* (pp. 1–341).
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. (2015). In *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)* (pp. 1–226).
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>
- Ramirez 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.
- Rodríguez Suesca, E. J. (2018). *Estudio de arco eléctrico en la Subestación Donato (Tunja) para la Empresa de Energía de Boyacá EBSA SAESP*.
- Rubbo, G. E., Corasaniti, V. F., & Barbieri, M. B. (2020). Estudio de Arco Eléctrico en una Subestación Eléctrica. *2020 IEEE Congreso Biental de Argentina (ARGENCON)*, 1–6.
- Villegas, M. (2003). *SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRA ALTA TENSION* (Segunda Ed). Impresiones Gráficas Ltda.

11. Anexos.

Anexo 1. Certificado de traducción de resumen

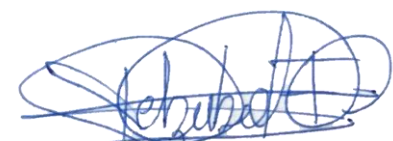
Miskolc, 30 de enero del 2023.

Yetzabbel Gerarda Flores Carpio, portador del documento de identidad N°1900391838, poseedor del **certificado INGLES INTERMEDIO SUPERIOR - C1**, expedido por la **Universidad de Miskolc** adjunto al título de educación superior con **número de registro 3482152549** del SENESCYT.

Por medio de la presente tengo a bien **CERTIFICAR**:

Que he realizado la traducción al idioma inglés del resumen derivado del Trabajo de Titulación: **Riesgos del arco eléctrico en el sistema de puesta a tierra de subestaciones eléctricas**, de autoría del Sr. Jackson Francisco Flores Carpio, portador de la cédula de identidad N° 1900391853.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, a su vez autorizo al interesado a hacer el uso del presente para los fines que considere pertinentes.



Yetzabbel Gerarda Flores Carpio

Master en Ingeniería Hidrogeológica