



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Análisis de Arc Flash en la subestación eléctrica del pie
de la chimenea 249 de la UM Yumpag mediante la
aplicación del software ETAP**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

Marcos GAITAN ANDRADE

ASESOR

Dr. Luis Mark Rudy PONCE MARTÍNEZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Gaitan, M. (2025). *Análisis de Arc Flash en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la UM Yumpag mediante la aplicación del software ETAP*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Marcos Gaitan Andrade
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	7232614
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luis Mark Rudy Ponce Martinez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08117818
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9037-6794
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Elias Moscoso Sanchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07206008
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Luis Mejía Olivas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10053479
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Alfredo Rocha Jara
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08645523
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.1 Energética
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	Unidad Minera Yumpag de Empresa Compañía de Minas Buenaventura S.A.A Región: Pasco Provincia: Daniel Alcides Carrión Distrito: Yanahuanca Comunidad Campesina: Huachus y San Juan Baños de Rabi Latitud: -10.58190 Longitud: -76.63459
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Febrero 2024 – Julio 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

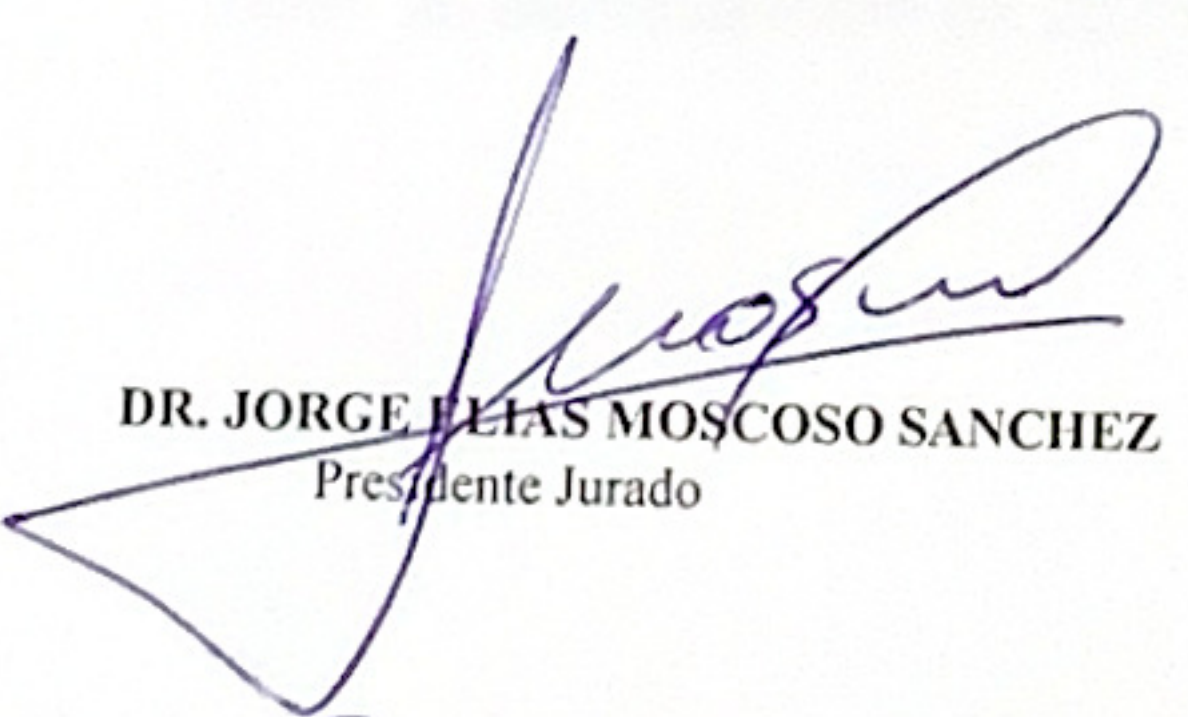
ACTA N°02/FIEE-CTGT/2025

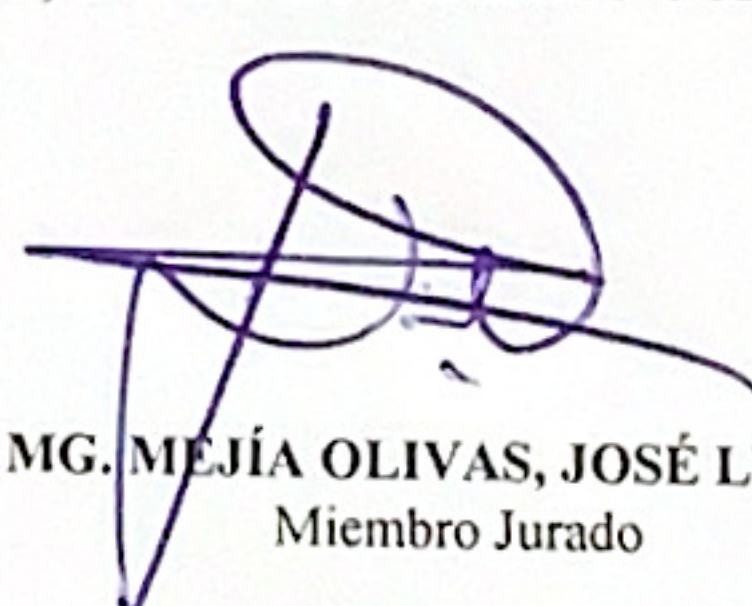
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 20 de noviembre del 2025, como presidente de Jurado el **DR. JORGE ELIAS MOSCOSO SANCHEZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. MEJÍA OLIVAS, JOSÉ LUIS**, el Miembro de Jurado **MG. ALFREDO ROCHA JARA** y Miembro Asesor el **DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTINEZ**.

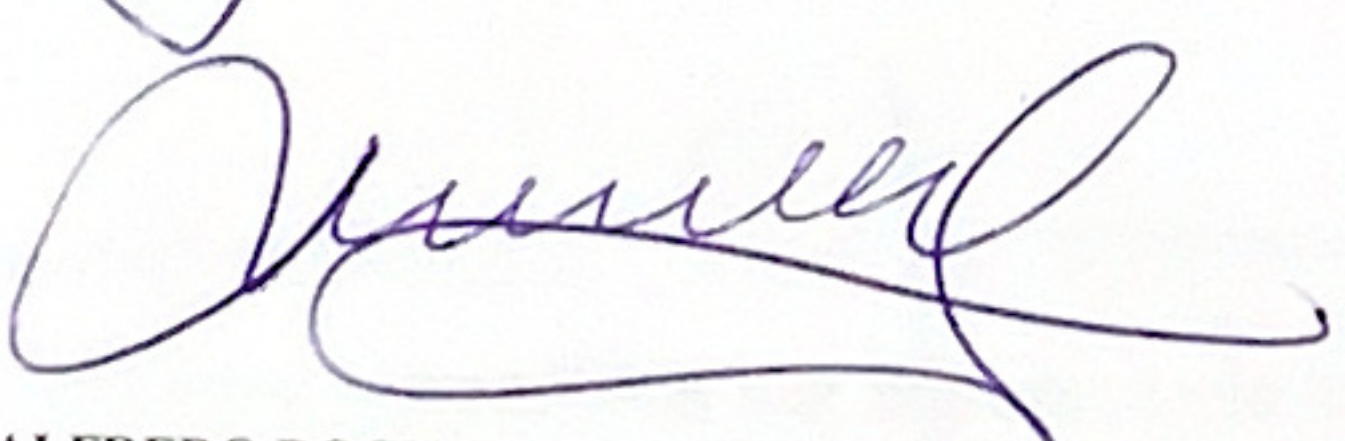
Después de escuchar la Sustentación de la Tesis del Bachiller **MARCOS GAITAN ANDRADE** con código **17190225** que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista sustentó el trabajo de Tesis titulado **ANÁLISIS DE ARC FLASH EN LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DEL PIE DE LA CHIMENEA 249 DE LA UM YUMPAG MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE ETAP**.

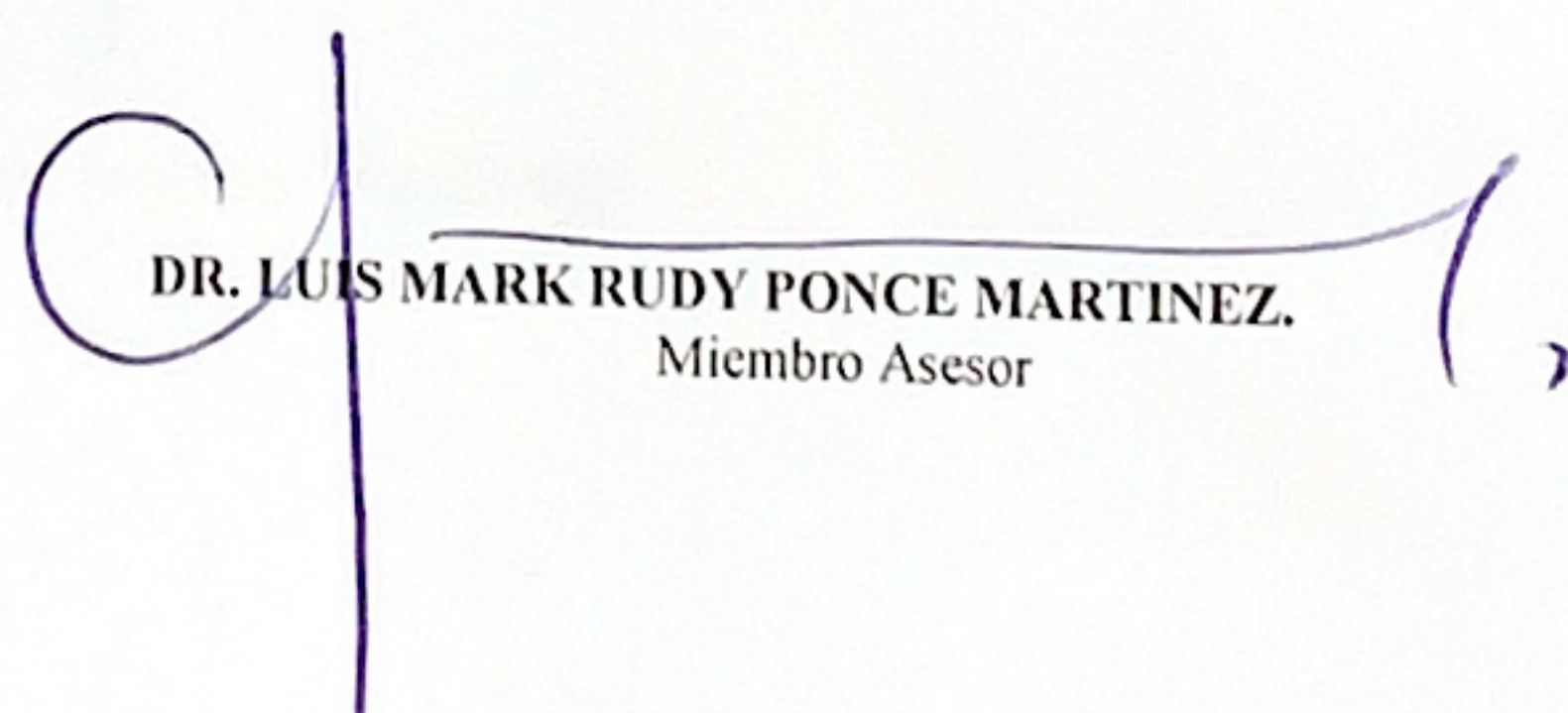
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de *Distinto* (16)

Ciudad Universitaria, 20 de noviembre del 2025


DR. JORGE ELIAS MOSCOSO SANCHEZ
Presidente Jurado


MG. MEJÍA OLIVAS, JOSÉ LUIS
Miembro Jurado


MG. ALFREDO ROCHA JARA
Miembro Jurado


DR. LUIS MARK RUDY PONCE MARTINEZ
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Luis Mark Rudy Ponce Martínez en mi condición de asesor acreditado con la **DICTAMEN N°001-EPIEI-2025-FIEE/UNMSM** de la tesis titulada “Análisis de Arc Flash en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la UM Yumpag mediante la aplicación del software ETAP” presentado por el bachiller Marcos Gaitan Andrade, para optar el título profesional de Ingeniero Electricista, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 17% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado/ título/ especialidad correspondiente.

Lima, 25 de noviembre de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Luis Mark Rudy Ponce Martínez

DNI: 08117818

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis amados padres, Claudia y Armando, por ser mi inagotable fuente de fortaleza, amor y guía. A mis queridos hermanos, por llenar mis días de alegría y compañía. A toda mi familia, por su presencia constante y su apoyo incondicional; cada uno de mis triunfos les pertenece, porque son por y para ustedes. Y a la persona que me inspira a superarme cada día, a mi compañera de sueños y desafíos, por sus palabras alentadoras, su apoyo incansable y las motivaciones que me impulsan a seguir adelante. Todo este esfuerzo y dedicación ha sido posible gracias a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios, por regalarme la vida, la salud y la fortaleza para seguir adelante, por guiar mis pasos y sostenerme siempre en el camino correcto.

A mis padres, Claudia y Armando, por su amor incondicional y por ser el cimiento sobre el que he construido cada uno de mis sueños. En especial a mi madre, cuyo esfuerzo, dedicación y sacrificio son el reflejo más puro de humildad y perseverancia, inspiración que me impulsa a alcanzar cada meta.

A mis hermanos, por su compañía sincera, sus consejos y por estar presentes en los momentos en que más los necesité.

A la persona que comparte mi vida y me anima a ser mejor cada día, por su apoyo constante, su paciencia y por creer en mí incluso cuando las dudas aparecían.

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por brindarme no solo conocimientos, sino también valores que me han formado como profesional y como ser humano.

A mis familiares y amigos, por sus palabras de aliento y por la confianza que depositaron en mí.

Este logro no es solo mío, es fruto del amor, la fe y el apoyo de todos ustedes.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar el riesgo asociado al arco eléctrico (Arc Flash) en la subestación eléctrica ubicada en el pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag, con el propósito de garantizar la seguridad del personal operativo y la continuidad de las operaciones. El estudio responde a la pregunta principal: ¿Cómo influye el riesgo asociado al arco eléctrico (energía incidente y distancia de seguridad) en la protección del personal operativo de la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249?, así como a interrogantes específicas relacionadas con la determinación de la energía incidente, las distancias de seguridad, las fronteras de protección y la selección adecuada de equipos de protección personal (EPP).

La metodología empleada corresponde a una investigación aplicada, no experimental, transversal y descriptiva, utilizando el software ETAP para realizar simulaciones basadas en las normativas NFPA 70E e IEEE 1584. Se modelaron las dos subestaciones principales en media tensión (10 kV y 4.16 kV) y se calcularon parámetros críticos para la mitigación del riesgo.

Los resultados confirman que la energía incidente alcanza hasta 11.84 cal/cm² en barras de 10 kV (categoría 3), estableciendo la necesidad de EPP especializado que soporte al menos 25 cal/cm², así como distancias mínimas de trabajo de 91.4 cm y fronteras de arco eléctrico de hasta 3.93 m. Se concluye que la aplicación de simulaciones en ETAP y el cumplimiento de normativas internacionales constituyen una estrategia eficaz para reducir la exposición a riesgos térmicos y mejorar la seguridad eléctrica en entornos mineros.

Palabras clave: arco eléctrico, Arc Flash, energía incidente, distancia de seguridad, frontera de protección, ETAP, NFPA 70E, IEEE 1584, subestación eléctrica, media tensión, equipos de protección personal, seguridad eléctrica.

ABSTRACT

This research focuses on analyzing the risk associated with arc flash in the electrical substation located at the base of chimney 249 in the Yumpag mining unit, aiming to ensure personnel safety and operational continuity. The study addresses the main question: How does the risk associated with arc flash (incident energy and safety distance) affect the protection of operating personnel in the electrical substation at chimney 249?, as well as specific questions regarding the determination of incident energy, safety boundaries, and the selection of appropriate personal protective equipment (PPE).

The methodology applied is technological, non-experimental, cross-sectional, and descriptive, using ETAP software to perform simulations based on NFPA 70E and IEEE 1584 standards. Two main medium-voltage substations (10 kV and 4.16 kV) were modeled to calculate critical parameters for risk mitigation.

Results indicate that incident energy reaches up to 11.84 cal/cm² at 10 kV buses (Category 3), requiring PPE rated for at least 25 cal/cm², along with minimum working distances of 91.4 cm and arc flash boundaries up to 3.93 m. The study concludes that implementing ETAP simulations and complying with international standards is an effective strategy to reduce thermal hazards and enhance electrical safety in mining environments.

Keywords: arc flash, incident energy, safety distance, protection boundary, ETAP, NFPA 70E, IEEE 1584, electrical substation, medium voltage, personal protective equipment, electrical safety.

INDICE

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
INDICE	VI
INDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.2 Planteamiento del problema de investigación.....	13
1.3 Formulación del problema.....	16
1.3.1 <i>Problema general</i>	<i>16</i>
1.3.2 <i>Problemas específicos</i>	<i>16</i>
1.4 Objetivos	16
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	<i>16</i>
1.4.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
1.5 Importancia y alcance de la investigación	17
1.5.1 <i>Justificación</i>	<i>17</i>
1.5.2 <i>Alcances de la investigación.....</i>	<i>19</i>
1.5.3 <i>Limitaciones de la investigación</i>	<i>19</i>
2 CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 Marco Teórico	20
2.1.1 <i>Arco eléctrico.....</i>	<i>20</i>
2.1.2 <i>Características del arco eléctrico.....</i>	<i>20</i>
2.1.3 <i>Etapa de formación de un arco eléctrico</i>	<i>22</i>
2.1.4 <i>Causas del Arco Eléctrico.....</i>	<i>23</i>
2.1.5 <i>Fenómenos generados por arco eléctrico.</i>	<i>24</i>
2.1.6 <i>Riesgos asociados al arco eléctrico</i>	<i>27</i>
2.1.7 <i>Frontera de protección contra arco eléctrico</i>	<i>32</i>
2.1.8 <i>Normativa y estándares.....</i>	<i>35</i>

2.1.9	<i>Seguridad eléctrica contra arco eléctrico</i>	46
2.1.10	<i>Análisis de arco eléctrico usando ETAP</i>	49
2.2	Antecedentes de la investigación	56
2.2.1	<i>Antecedentes nacionales</i>	56
2.2.2	<i>Antecedentes internacionales</i>	59
2.3	Definición de términos	61
2.3.1	<i>Arco eléctrico</i>	61
2.3.2	<i>Energía incidente</i>	61
2.3.3	<i>Distancia de trabajo</i>	61
2.3.4	<i>Límite de arco eléctrico</i>	61
2.3.5	<i>Corriente de falla de arco</i>	61
2.3.6	<i>Dispositivos eléctricos de protección</i>	61
2.3.7	<i>Etiquetas de seguridad</i>	61
2.3.8	<i>Media tensión</i>	61
2.3.9	<i>Baja tensión</i>	62
2.3.10	<i>Equipo de protección personal</i>	62
2.3.11	<i>Seguridad eléctrica</i>	62
2.3.12	<i>Peligro eléctrico</i>	62
2.3.13	<i>Riesgo eléctrico</i>	62
3	CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES	62
3.1	Hipótesis	62
3.1.1	<i>Hipótesis general</i>	62
3.1.2	<i>Hipótesis específicas</i>	62
3.2	Variables	63
3.2.1	<i>Variable independiente</i>	63
3.2.2	<i>Variable dependiente</i>	63
3.2.3	<i>Operacionalización de las variables</i>	63
4	CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS	65
4.1	Área De Estudio	65
4.2	Diseño de la investigación	66
4.3	Población y muestra	67
4.3.1	<i>Población</i>	67
4.3.2	<i>Muestra</i>	67

4.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información.....	68
4.4.1 <i>Procedimientos de recolección de información</i>	68
4.4.2 <i>Técnicas de recolección de información.....</i>	68
4.4.3 <i>Instrumentos de recolección de información</i>	73
5 CAPÍTULO V: RESULTADOS	79
5.1 Presentación y análisis de los resultados.	79
5.1.1 <i>Resultados.....</i>	79
5.1.2 <i>Análisis de resultados.....</i>	89
6 CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN	99
7 CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	101
7.1 <i>Conclusiones.....</i>	101
7.2 <i>Recomendaciones.....</i>	102
8 CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS.....	103
9 ANEXOS.....	106

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Cronología de normativas del Arc Flash.....	14
<i>Figura 2</i> Ejemplo de etiquetas de riesgo eléctrico	15
<i>Figura 3</i> Partes del arco eléctrico mediante modelo generado en Ansys	21
<i>Figura 4</i> Arco eléctrico y ráfaga de arco	27
<i>Figura 5</i> Zonas del cuerpo humano afectadas por quemaduras.....	28
<i>Figura 6</i> Niveles de ruido en dB.....	30
<i>Figura 7</i> Arco eléctrico con emisión de gases tóxicos	30
<i>Figura 8</i> Zonas y umbrales de choque eléctrico	31
<i>Figura 9</i> Límites o fronteras de aproximación	33
<i>Figura 10</i> Límites o fronteras de aproximación	34
<i>Figura 11</i> Módulo de arco eléctrico en software ETAP.....	50
<i>Figura 12</i> Falla de arco en aire libre	54
<i>Figura 13</i> Arco en equipos cerrados	55
<i>Figura 14</i> Ubicación de la unidad minera Yumpag.	65
<i>Figura 15</i> Ubicación de las subestaciones en la chimenea 249.....	66
<i>Figura 16</i> Diagrama unifilar aguas arriba de la chimenea 249.....	69
<i>Figura 17</i> Subestación eléctrica principal SE-P-IM-01	70
<i>Figura 18</i> Subestación eléctrica principal SE-P-IM-02.....	71
<i>Figura 19</i> Diagrama unifilar general de las dos subestaciones eléctricas....	72
<i>Figura 20</i> Flujo de trabajo para cálculo del arco eléctrico.....	73
<i>Figura 21</i> Configuración del caso de estudio del arco eléctrico	74
<i>Figura 22</i> Configuración del método de cálculo del arco eléctrico	75
<i>Figura 23</i> configuración de parámetros para el cálculo del arco eléctrico ...	76
<i>Figura 24</i> Configuración de a barra para el cálculo del arco eléctrico	78
<i>Figura 25</i> Diagrama unifilar general de flujo de potencia en ETAP.....	80
<i>Figura 26</i> Diagrama unifilar de flujo de potencia en ETAP de SE-P-IM-01..	81
<i>Figura 27</i> Diagrama unifilar de flujo de potencia en ETAP de SE-P-IM-02..	82
<i>Figura 28</i> Diagrama unifilar general de corto circuito en ETAP	83
<i>Figura 29</i> Diagrama unifilar de corto circuito en ETAP de SE-P-IM-01.....	84
<i>Figura 30</i> Diagrama unifilar de corto circuito en ETAP de SE-P-IM-02.....	85
<i>Figura 31</i> Diagrama unifilar general de arco eléctrico en ETAP	87
<i>Figura 32</i> Diagrama unifilar de arco eléctrico en ETAP de SE-P-IM-01.....	88

<i>Figura 33</i> Diagrama unifilar de arco eléctrico en ETAP de SE-P-IM-02.....	88
<i>Figura 34</i> Traje anti arco	91
<i>Figura 35</i> Guantes dieléctrico	92
<i>Figura 36</i> Casco y careta anti arco	93
<i>Figura 37</i> Zapatos dieléctricos	94
<i>Figura 38</i> Botas dieléctrica	95
<i>Figura 39</i> Pasamontañas anti arco	96
<i>Figura 40</i> Kits de vestimenta anti arco	97
<i>Figura 41</i> Vestimenta completa para categoría 4	97
<i>Figura 42</i> Etiqueta de arco eléctrico de las subestaciones en 10.0kV	98
<i>Figura 43</i> Ubicación de etiquetas en acceso principal de la subestación ..	100

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Correlación de las clasificaciones de Benaim, Converse-Smith y American Burns Association (ABA)	29
<i>Tabla 2</i> Distancias mínimas de trabajo	35
<i>Tabla 3</i> Clases de equipos y separaciones de bus típicas	42
<i>Tabla 4</i> Relación entre el equipo utilizado y la disposición de los electrodos	43
<i>Tabla 5</i> Clases de equipamiento y distancias típicas de trabajo	44
<i>Tabla 6</i> Categorías de equipos de protección personal	48
<i>Tabla 7</i> Operacionalización de variables	64
<i>Tabla 8</i> Datos de Thévenin del sistema eléctrico	69
<i>Tabla 9</i> Característica de la subestación eléctrica	70
<i>Tabla 10</i> Listado de equipos principales en las subestaciones eléctricas ...	71
<i>Tabla 11</i> Resultados de flujo de potencia	79
<i>Tabla 12</i> Resultados de corto circuito	82
<i>Tabla 13</i> Resultados de Ajustes del Dispositivo de Protección - Relé	85
<i>Tabla 14</i> Resultados de energía incidente	86
<i>Tabla 15</i> Resultados de distancia de seguridad y Frontera de arco eléctrico	87
<i>Tabla 16</i> Resultados de las características de equipos de protección personal	87
<i>Tabla 17</i> Resultados de energía incidente y corriente de arco	89
<i>Tabla 18</i> Equipos de protección personal en las subestaciones eléctricas .	90
<i>Tabla 19</i> Clasificación de guantes dieléctricos para las subestaciones	91

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En el sector industrial y minería, la seguridad eléctrica es importante y fundamental para garantizar la seguridad del personal. Uno de los riesgos más críticos es el arco eléctrico o *Arc Flash*, un fenómeno que puede desencadenar daños fatales y catastróficos si no se tienen implementadas las medidas de seguridad adecuadas. El *Arc Flash* surge cuando una corriente eléctrica se desvía inesperadamente a través del aire, generando una explosión que puede provocar quemaduras severas, daños auditivos y visuales, así como daños en equipos importantes.

En la unidad minera Yumpag, el riesgo asociado al arco eléctrico es considerado importante debido a las características de la subestación eléctrica ubicada en el pie de la chimenea 249, que opera a niveles de media tensión (10.0 kV y 4.16 kV). Estas subestaciones alimentan a otras subestaciones de distribución y que estas alimentan a las cargas importantes como el bombeo, ventilación y equipos de operación mina.

Debido a la existencia del riesgo asociado con el arco eléctrico se realiza el análisis de arco eléctrico mediante el uso de herramienta como el software ETAP que permite analizar los riesgos asociados al *Arc Flash*, proporcionando los resultados importantes como la energía incidente, las distancias de seguridad, fronteras de protección y la facilitación adecuada para seleccionar los equipos de protección personal (EPP) necesarios para minimizar los riesgos en los trabajadores. El ETAP realiza la simulación de eventos de *Arc Flash*, basado en normativas internacionales como la NFPA 70E y la IEEE 1584.

En esta investigación realiza el análisis del riesgo asociado al *Arc Flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag mediante el uso de ETAP, con el fin de establecer medidas de seguridad que garanticen la protección del personal operativo y la continuidad de las operaciones.

1.2 Planteamiento del problema de investigación

En el ámbito de la seguridad eléctrica industrial, el análisis de *Arc Flash* se ha convertido en un tema importante debido a su potencial impacto en la seguridad de los trabajadores y en la continuidad de las operaciones.

Durante la ocurrencia de un arco eléctrico, se genera una intensa emisión de luz, calor y ruido, acompañada por una onda expansiva resultante de la explosión. Esta onda puede arrojar fragmentos plásticos o metálicos de los dispositivos eléctricos, funcionando como proyectiles. En vista de estos factores, la exposición a un arco eléctrico sin la debida protección puede acarrear consecuencias graves, como quemaduras severas, pérdida de la audición y la visión, así como impactos y lesiones derivados de la onda expansiva. Los arcos eléctricos pueden surgir de manera inesperada debido a factores ambientales, tales como la presencia de suciedad o polvo, partículas metálicas u óxido, niveles de humedad elevados o el deterioro de los materiales aislantes en la instalación. Por otro lado, no debemos descartar las causas de origen humano, que tienden a ser las más comunes en este tipo de incidentes. Estas se originan por contacto accidental con herramientas u objetos en el área de trabajo, o por la falta de seguimiento de los protocolos de seguridad establecidos (Moracho, 2021).

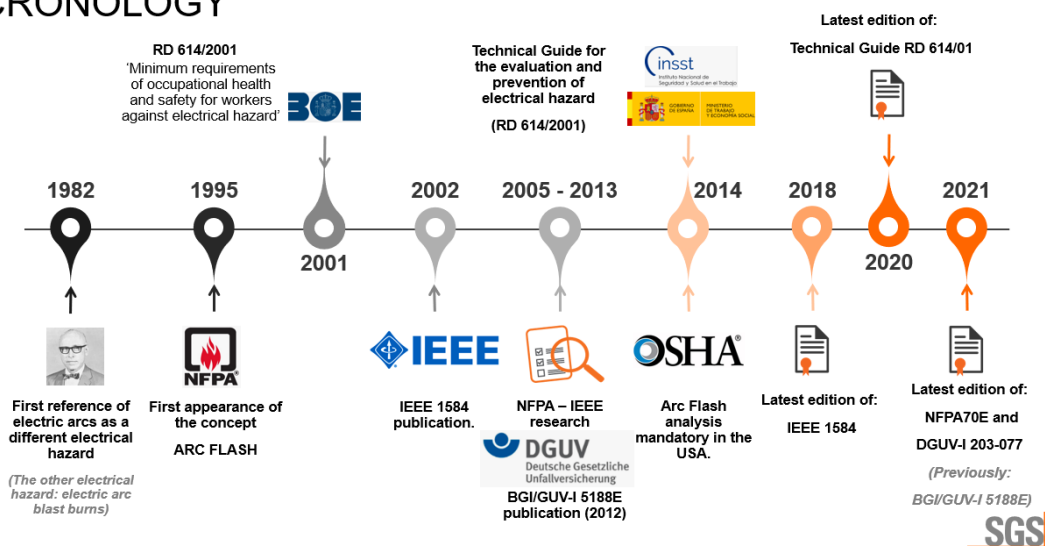
El arco eléctrico es perjudicial no sólo para las personas, sino también para las propias instalaciones, dando lugar a elevados costes que generan a las empresas mineras y sectores industriales.

Desde la década de 1980, según la figura 1 se han ido controlando e implementando el análisis de arco eléctrico en sectores industriales.

Figura 1

Cronología de normativas del Arc Flash.

CRONOLOGY



Nota: cronología de normativas según (Cabello García, 2023)

El *arc flash* está asociado a las labores de mantenimiento y operación en instalaciones eléctricas, no siempre, el uso de equipos de protección personal (EPP) es suficiente para proteger a los trabajadores que realizan trabajos en sistemas energizados, además pueden quedar expuestos a múltiples situaciones según lo indica la NFPA 70E (Cabello García, 2023)

Según OSHA, las quemaduras por arco eléctrico son uno de los tres peligros más comunes cuando se realiza las operaciones con equipos energizados.

Cada día en los EE. UU. se producen hasta 10 incidentes de arco eléctrico, lo que suma un total de más de 3600 lesiones incapacitantes por contacto eléctrico cada año. La naturaleza violenta de la exposición al arco eléctrico, que puede provocar una muerte, incluso si un trabajador se encuentra a 10 pies del lugar de la explosión. (Benita, 2020)

La unidad minera Yumpag de la compañía minera Buenaventura está iniciando sus labores de explotación en interior mina en distintos frentes de

trabajos donde se tienen equipos de ventilación, bombeo y facilidades. El suministro de energía hacia estas cargas parte desde subestaciones de distribución y esto desde dos subestaciones principales del pie de la chimenea 249 en interior mina en media tensión 10 kV.

Debido a que se realizan actividades de mantenimiento y operación en estas subestaciones se tiene el riesgo asociado al *arc flash* que podrían ocasionar accidentes como daños perjudiciales a personas y a los activos de la unidad minera Yumpag, estos deben de tener la señalización o etiquetas que resuma la energía incidente, la distancia de seguridad relacionada con el peligro y la adecuación del equipo del personal. Por lo que se ve en la necesidad de realizar el análisis de *arc flash* para determinar estos resultados haciendo uso del software ETAP.

Figura 2

Ejemplo de etiquetas de riesgo eléctrico

  DANGER Flash & Shock Hazard with Covers or Doors Open Appropriate PPE Required 	
Protección Contra Destello Categoría de Peligro por Destello 3 Energía Incidente (cal/cm²) 9.8 Límite de Protección Contra Destello 1.64 m A total clothing system consisting of FR shirt and pants and/or FR coveralls and/or arc flash coat and pants (clothing system minimum arc rating of 40)	Protección Contra Conmoción 480 VAC Peligro de Conmoción Cuando covers removed Borde de Acercamiento Limitado 1.07 m Límite de Acercamiento Restringido 0.30 m Límite de Acercamiento Prohibido 0.03 m Guantes de PP Clase 00 V-Rating 500 VAC
Equipo: 0210MCL0001 Dispositivo de Protección de Fuente: 0210SGL0001_CB-04 Equipo Name	
Contrato # Ingeniero: A. HUAYNATE / A. NOVA Fecha: 23-10-2020	
Los cambios en la configuración del equipo o la configuración del sistema invalidará los valores calculados y los requisitos de PPE que puede resultar en una condición peligrosa.	

Fuente: Etiqueta de riesgo eléctrico elaborado por (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2020)

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo influye el riesgo asociado al arco eléctrico (energía incidente y distancia de seguridad) en la seguridad del personal operativo de la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag?

1.3.2 Problemas específicos

¿Cuál es la energía incidente para mitigar el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag?

¿Cuál es la distancia de seguridad para mitigar el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag?

¿Cuál es la frontera de protección para mitigar el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag?

¿Qué características deberán de tener los equipos de protección personal para reducir el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del riesgo asociado al arco eléctrico (energía incidente y distancia de seguridad) en la seguridad del personal operativo de la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag, mediante simulaciones en software ETAP y normativa NFPA 70E.

1.4.2 Objetivos específicos

- Calcular la energía incidente para mitigar el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag.
- Determinar las distancias de seguridad para mitigar el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag.
- Determinar las fronteras de protección para reducir el riesgo asociado al *arc flash* en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag.
- Seleccionar las características de los equipos de protección personal que deben de utilizar los trabajadores en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag.

1.5 Importancia y alcance de la investigación

1.5.1 Justificación

Con la presente investigación se genera un aporte al sistema de seguridad laboral y de operatividad de la unidad minera Yumpag.

En seguridad laboral como contribución a la protección de los trabajadores en operación y mantenimiento de los equipos eléctricos en la subestación principal, debido a la existencia del riesgo de arco eléctrico que se podría ocasionar accidentes devastadores como quemaduras de tercer grado, al determinar la energía incidente se podrá seleccionar adecuadamente los equipos de protección personal.

En la operatividad de la unidad minera puede verse afectado por la paralización de actividades no planificadas por accidentes del personal debido al arco eléctrico, como consecuencia puede verse afectado en la reducción producción y costos de equipos asociados a reparación o cambio. Al garantizar que la subestación eléctrica sea seguro para las operaciones mejorará la producción y minimizará la inactividad de labores.

Justificación teórica

El análisis del arco eléctrico en industrias como el sector minero es importante debido a la seguridad que se tiene con el personal y los equipos, por lo que se debe de realizar un análisis antes de la operación de la subestación eléctrica con el fin de prevenir riesgos asociados al *arc flash* teniendo en cuenta la base teórica fundamentados en normativas internacionales y nacionales como la National Fire Protection Association (NFPA 70E), Institute of Electrical and Electronic Engineers(IEEE 1584).

Estas normativas establecen las metodologías para calcular los niveles de energía incidente, distancias de seguridad, además permitirá la sección adecuada de los equipos de protección personal, así como en la normativa internacional la NFPA 70E establece requisitos específicos para la protección contra arcos eléctricos, y este estudio busca cumplir con dichas normativas, asegurando la adecuada protección de los trabajadores y la mitigación de riesgos.

Mediante el uso del software ETAP se puede realizar simulaciones sobre el comportamiento del sistema eléctrico ante eventos de arco eléctrico, ya que este software está haciendo uso de las normativas como el IEEE 1584 y la NFPA 70E.

Justificación práctica

En la unidad minera Yumpag se realizan trabajos de mantenimiento y operación de equipos de la subestación eléctrica por lo que se deben realizar estos trabajos en condiciones seguras ante posibles eventos de arco eléctrico. En este estudio se debe de proteger al personal y los equipos eléctricos.

Mediante el análisis del *arc flash* en el software ETAP se podrá obtener resultados más precisos de la energía incidente, distancias de seguridad y la elección de los equipos de protección personal que deben de tener en cuenta cuando se realicen los trabajos de operación y mantenimiento de las dos subestaciones principales en 10 kV en interior mina.

1.5.2 Alcances de la investigación

En este trabajo de investigación para realizar el análisis de *Arc Flash* se realizarán el modelamiento del sistema eléctrico en el software ETAP de las dos subestaciones eléctricas principales del pie de la chimenea 249 en interior mina.

Simulación de *Arc Flash* en las barras de media tensión y elección de equipos de protección personal que servirán como medidas de seguridad específicas para reducir los riesgos de *Arc Flash*.

1.5.3 Limitaciones de la investigación

Esta investigación tiene limitaciones de los datos del sistema eléctrico de las demás subestaciones de distribución enlazadas con la subestación principal, solo se tienen cargas eléctricas generales.

Factores externos como cambios en las condiciones ambientales o el mantenimiento de equipos pueden influir en la seguridad eléctrica, pero no se abordan en esta investigación.

El análisis de arco eléctrico abarca a sistemas de corriente interna en media tensión de 4.16 kV y 10.0 kV.

2 CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Arco eléctrico

El arco eléctrico es una descarga o falla que ocurre cuando una corriente fluye entre una fase conductora o entre la fase conductora y la tierra que son dos superficies de diferente potencial. El arco eléctrico se presenta como un fenómeno complejo que involucra la interacción de múltiples procesos físicos simultáneos durante su formación, propagación y extinción. Estos eventos ocurren en tiempos extremadamente breves, del orden de microsegundos, lo que aumenta la complejidad de su estudio. La resolución de estos problemas requiere una comprensión profunda de áreas como la dinámica de fluidos, el electromagnetismo y la termodinámica. Para abordar la explicación de cómo interactúan estos fenómenos, resulta esencial emplear la teoría magnetohidrodinámica (MHD) (Moreno Torres, Manuel Luna, García González, Luviano rtiz, & Hernandez uerrero, 2019).

Esta disciplina se enfoca en analizar el comportamiento de fluidos en presencia de campos eléctricos y magnéticos, y en comprender los efectos resultantes de estas interacciones en un fluido en movimiento. En términos generales, en situaciones donde el aire es el medio de interacción para la formación del arco eléctrico, este se origina cuando el aire es ionizado, convirtiéndose en un conductor eléctrico que permite el flujo de corriente eléctrica. A medida que la corriente atraviesa el aire, se genera un calentamiento considerable en el medio, lo que provoca la transformación del aire en plasma. Debido a las altas temperaturas presentes en el plasma, el arco eléctrico exhibe propiedades eléctricas, magnéticas y térmicas únicas que lo distinguen de otros conductores, lo que justifica la aplicación de la teoría MHD para su análisis y comprensión. (Moreno Torres, Manuel Luna, García González, Luviano rtiz, & Hernandez uerrero, 2019)

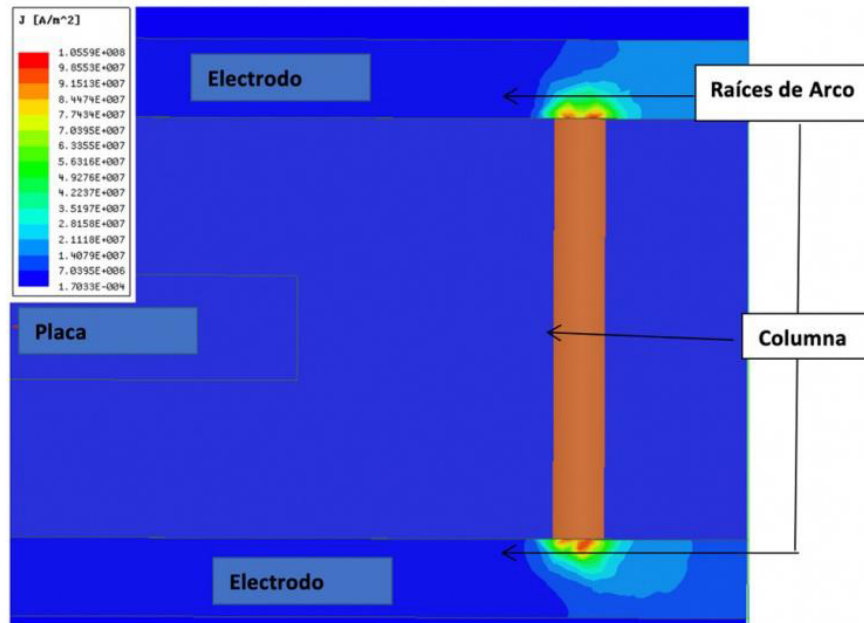
2.1.2 Características del arco eléctrico

Durante el proceso de ionización, el arco eléctrico exhibe un comportamiento conductor con una conductividad que oscila entre 10 s/cm y 100 s/cm, dependiendo de la temperatura alcanzada en su interior. En este

contexto, se pueden distinguir tres regiones fundamentales que conforman el arco eléctrico: la zona central o columna, la región del ánodo y la región del cátodo, conocida como las raíces del arco, como se muestra en la figura 3:

Figura 3

Partes del arco eléctrico mediante modelo generado en Ansys



Fuente: (Moreno Torres, Manuel Luna, García González, Luviano rtiz, & Hernandez uerrero, 2019)

La región del cátodo se caracteriza por la presencia de vapores de metal provenientes del cátodo. En esta área, se encuentran numerosos iones positivos y un número reducido de electrones. Un campo eléctrico intenso y temperaturas elevadas son rasgos distintivos de esta región, al igual que altas densidades de corriente, características compartidas con la zona central. En esta área, el cátodo libera electrones que son impulsados por un intenso campo eléctrico, adquiriendo la energía necesaria para ionizar otras partículas neutras en el entorno. En la columna del arco, el flujo de corriente se facilita mediante la migración de electrones. Esta región presenta un exceso de iones positivos que equilibran la carga de los electrones, generando altas concentraciones de energía y bajas caídas de voltaje (Moreno Torres, Manuel Luna, García González, Luviano rtiz, & Hernandez uerrero, 2019).

Cerca del ánodo, debido a la repulsión de iones positivos y la atracción de electrones, se genera un área con carga positiva, lo que provoca una fuerte reducción de voltaje, conocida como la caída anódica. La energía perdida en esta disminución de voltaje en cada área se transforma en calor y se dispersa hacia el entorno mediante mecanismos como la conducción, convección y radiación. Esta disipación de calor genera áreas con temperaturas que varían entre 6700 C° y 24700 C°. La ruptura molecular del medio, el desplazamiento de iones y moléculas, junto con la conductividad y capacidad térmica de los electrodos, además de las condiciones físicas en proximidad al arco, afectan significativamente la dispersión del calor, influyendo en la temperatura y presión dentro de la columna del arco. Otra característica relevante del arco eléctrico es la variación de la conductividad térmica y la viscosidad en función de la temperatura. (Moreno Torres, Manuel Luna, García González, Luviano rtiz, & Hernandez uerrero, 2019).

2.1.3 Etapa de formación de un arco eléctrico

Las primeras fases de la formación de un arco eléctrico se pueden clasificar en cuatro etapas:

- a) **Etapa de compresión:** al comenzar el arco eléctrico producto de una corriente de falla, el aire en la zona del arco se calienta de manera intensa debido a la constante liberación de energía. Este calentamiento, junto con la convección y la radiación térmica, también afecta al aire circundante en el compartimento. En esta etapa inicial, las temperaturas y presiones varían de un lugar a otro.
- b) **Etapa de expansión:** durante esta fase, la presión interna en el compartimento eléctrico comienza a aumentar gradualmente debido al aporte de calor generado por el arco eléctrico. Con el tiempo, esta energía acumulada se libera principalmente a través de la puerta del compartimento, y la presión aumenta hasta su punto máximo antes de comenzar a disminuir debido a la liberación del aire caliente.

- c) **Etapa de emisión:** como consecuencia del suministro continuo de energía del arco eléctrico, el aire se expulsa del cubículo eléctrico con una sobrepresión ligera y casi constante.
- d) **Etapa térmica:** una vez expulsado el aire caliente, la temperatura en el dentro del cubículo eléctrico se aproxima a la del arco eléctrico. En esta fase final, que persiste hasta que el arco desaparece, todos los materiales metálicos y los aislantes que están en contacto con el arco experimentan desgaste, lo que resulta en la liberación de gases, vapores tóxicos y partículas de material fundido. (Siu Yupanqui, 2018)

2.1.4 Causas del Arco Eléctrico

Las causas que provocan un arco eléctrico se pueden dividir en dos factores principales que aumentan su probabilidad de ocurrencia: fallos en el equipo y equivocaciones humanas. A continuación, se categorizan los diversos elementos que contribuyen a su formación.

El arco eléctrico, según el estándar 1584 de la IEEE mencionado en la revista venezolana de ciencia y tecnología por (Guevara G, Torres R, & Valero H, 2019) puede ser generado por:

- Partículas y suciedad: La presencia de Partículas y suciedad en la superficie del aislamiento puede formar un camino para la corriente, facilitando un flashover y provocando la descarga de arco sobre la superficie. Esto puede intensificar el arco eléctrico.
- Oxidación de los componentes: *“Puede generar la presencia de contaminantes sobre la superficie del aislamiento, debilitando la conexión entre las terminales de los conductores y elevando la resistencia de contacto debido a la oxidación u otras contaminaciones corrosivas”* (Guevara G, Torres R, & Valero H, 2019)
- Acumulación de humedad y filtración de agua: *“Pueden generar una trayectoria conductiva sobre la superficie de los materiales aislantes, lo que podría provocar un flashover hacia*

tierra y elevar la probabilidad de que se produzca un arco entre fases” (Guevara G, Torres R, & Valero H, 2019).

- Contacto accidental con partes expuestas y energizadas puede desencadenar una falla.
- Desprendimiento de Herramienta: el desprendimiento accidental de una herramienta puede provocar un cortocircuito momentáneo, produciendo chispas y dando inicio al arco.
- Sobre-Voltajes: debido a espacios reducidos de aire entre conductores de distintas fases es demasiado reducido (como consecuencia de la baja calidad o el deterioro de los conductores), puede generarse un arco durante una sobretensión temporal.
- Deficiencia de los materiales aislantes.
- Uso o diseño inadecuado del equipo.
- Métodos de trabajo incorrectos.

2.1.5 Fenómenos generados por arco eléctrico.

Dado que el arco eléctrico genera un calor extremo a través de explosiones y poderosas ráfagas de presión, un trabajador podría estar expuesto a estos riesgos. Además, *“tras entender el proceso físico del arco eléctrico, así como sus causas y etapas, se pueden identificar los procesos físicos que se originan a partir del arco eléctrico”* (Aguilar Pizarro, 2020), tales como:

a) Arc Flash (Relámpago de Arco):

Este fenómeno implica la emisión de energía en forma de calor y luz cuando una corriente eléctrica atraviesa el aire ionizado entre conductores que no están conectados a tierra o entre conductores que sí lo están.

Esta energía, conocida como Energía Incidente, se refiere a la *“cantidad de energía térmica que es transferida a una superficie ubicada a cierta distancia de la fuente del arco eléctrico. La Energía Incidente aumenta*

conforme se acorta la distancia con respecto al punto donde se origina el arco eléctrico, y su magnitud se expresa en $[cal/cm^2]$ " (Aguilar Pizarro, 2020) y esta emisión de energía se manifiesta en formas como:

- Calor: La energía térmica se libera en el aire, lo que provoca que los átomos y moléculas en el entorno aumenten su temperatura de manera significativa, alcanzando hasta 20,000 grados Celsius. Este proceso de ionización crea un estado de plasma en el aire, haciendo que este se comporte como un conductor debido a la alta concentración de cargas libres o debido a la formación de gases de componentes conductores a causa de la elevada temperatura del arco. La cantidad de energía térmica se mide en cal/cm^2 . (Siu Yupanqui, 2018)
- Radiación luminosa: El destello de arco genera una iluminación intensa y además libera radiación electromagnética, predominando la emisión en el rango ultravioleta. (UV) e infrarroja (IR). Estas radiaciones pueden causar quemaduras en la piel y en los ojos. (Siu Yupanqui, 2018)

b) Ráfaga de arco o *arc blast*

La descarga de energía se produce en forma de ondulatoria de choque provocada por la temperatura extremadamente alta generada por el arco eléctrico. Esta descarga de energía tiene muchos efectos.

- Onda de presión de gran intensidad: La onda de presión resultante puede alcanzar niveles de hasta 0.3 megapascuales (MPa), equivalente a una presión de 30 toneladas por metro cuadrado (T/m^2). Esta presión elevada puede causar daños mecánicos significativos en las instalaciones eléctricas y representar un riesgo físico para los trabajadores presentes. (Siu Yupanqui, 2018)
- Emisión de gases tóxicos: *“La descomposición de materiales y la producción de humo como consecuencia de un arco eléctrico constituyen un peligro importante para las personas cercanas*

que puedan inhalar estos gases. Estos gases pueden causar daños graves en los pulmones” (Siu Yupanqui, 2018).

- Proyección de objetos: Debido a la elevada presión generada, *“un arco eléctrico puede expulsar metal fundido u objetos que se desprenden de los tableros eléctricos. Estos objetos, al desplazarse a gran velocidad y bajo alta presión, se comportan como un proyectil que pueden representar un riesgo adicional” (Siu Yupanqui, 2018).*
- Generación de energía acústica: *“el sonido resultante de la brusca elevación de la presión atmosférica presente en ese instante en que se produce el arco eléctrico es capaz de alcanzar umbrales acústicos que llegan a los 140 decibelios (dB)” (Siu Yupanqui, 2018).* Estos niveles elevados de sonido pueden causar daños en el sistema auditivo de las personas expuestas.

c) El choque eléctrico:

se refiere a la liberación de energía que ocurre *“cuando hay contacto o proximidad con componentes de circuitos eléctricos que se encuentran bajo tensión. Cuando los trabajadores eléctricos interactúan con equipos eléctricos, siempre existe la posibilidad de sufrir una descarga eléctrica, que puede llevar a la electrocución” (Siu Yupanqui, 2018).* Los daños resultantes dependen de varios factores, que incluyen:

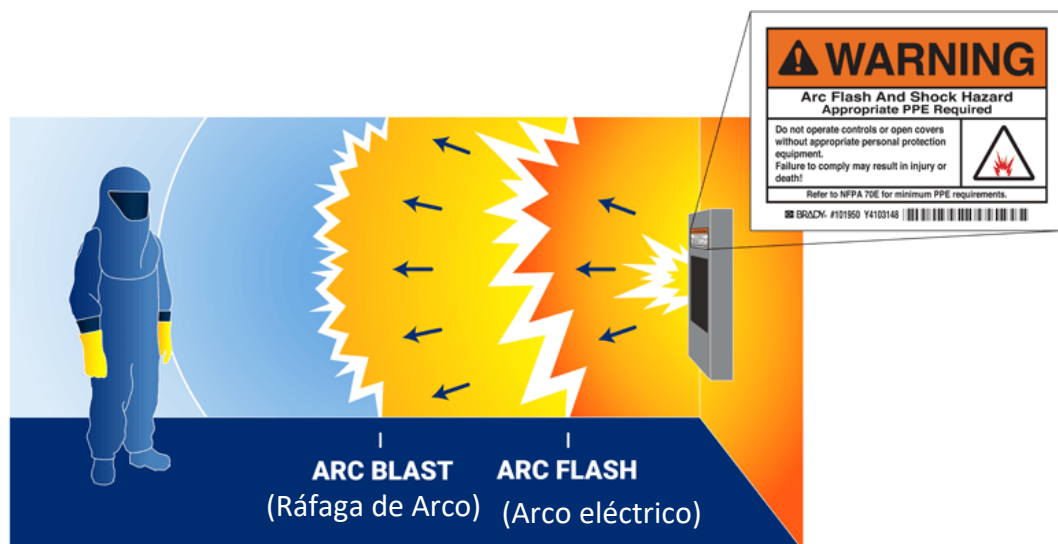
- Las características de los circuitos eléctricos, como corriente eléctrica, la resistencia, la frecuencia y el voltaje involucrados.
- La resistencia eléctrica tanto en el punto de contacto como internamente en el cuerpo humano.
- El recorrido que la corriente eléctrica realiza al pasar por el cuerpo humano está definido por el lugar de contacto y las características químicas del organismo.
- La duración del contacto con la corriente eléctrica.

- Las condiciones ambientales que pueden afectar la resistencia eléctrica en el punto de contacto del cuerpo con el circuito eléctrico.

En resumen, el riesgo y la gravedad de un choque eléctrico dependen de una combinación de factores relacionados con el circuito eléctrico, el cuerpo humano y las condiciones en las que ocurre el contacto eléctrico. (Siu Yupanqui, 2018).

Figura 4

Arco eléctrico y ráfaga de arco



Fuente: tomado de (Brady, 2024)

2.1.6 Riesgos asociados al arco eléctrico

- Riesgos de quemaduras

Son quemaduras causadas por el calor generado de la energía incidente.

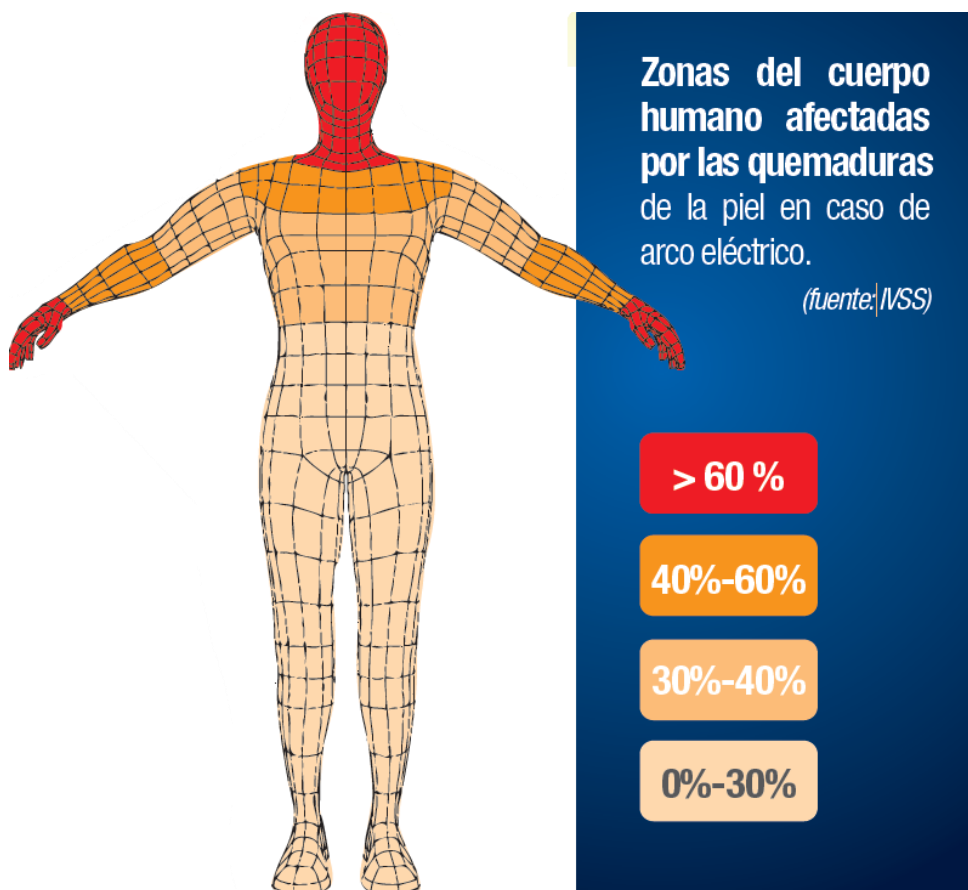
Según la (NFPA-70E, 2018) “cuando la corriente eléctrica fluye a través del aire entre conductores sin puesta a tierra o entre

líneas sin aterramiento y aquellos conectados a tierra, los niveles térmicos pueden ascender a cerca de 20,000 °C". Estas temperaturas extremas no solo queman directamente la piel, sino que también pueden incendiar la ropa, agravando las lesiones por quemaduras.

De acuerdo a la siguiente imagen las zonas con mayor probabilidad de sufrir severas quemaduras son la cabeza y las manos, estas quemaduras pueden ser de segunda o tercer grado.

Figura 5

Zonas del cuerpo humano afectadas por quemaduras



Nota. Tomado de (Segurinsa, 2013)

Tipos de quemaduras según clasificación

Tabla 1

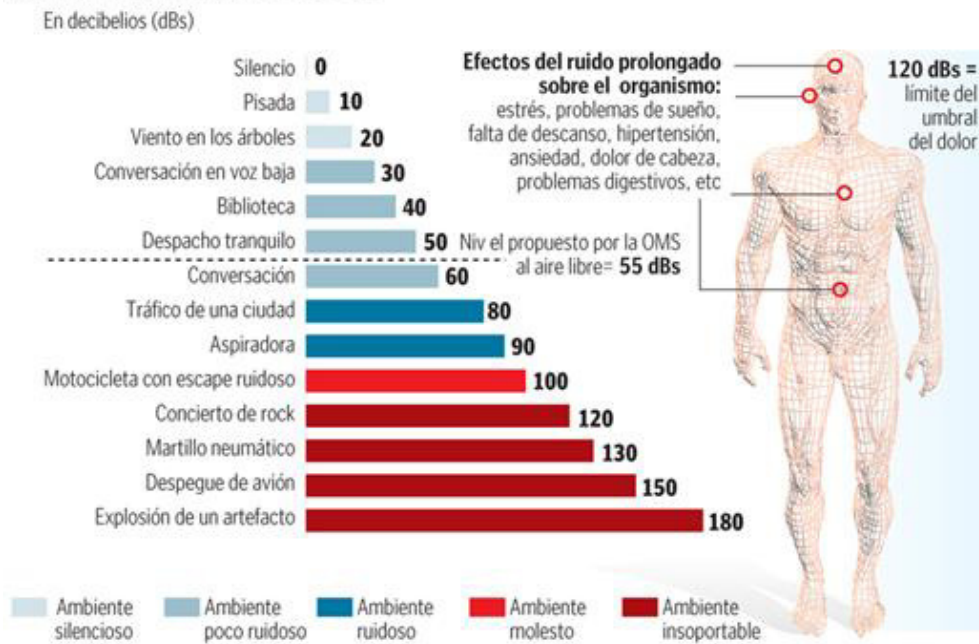
Correlación de las clasificaciones de Benaim, Converse-Smith y American Burns Association (ABA)

Benaim	Converse-Smith	ABA (American Burns Association)	Estrato cutáneo lesionado	pronóstico
Tipo A	Primer grado	Epidérmica	Epidermis	Curación espontanea hasta 7 días si secuelas
Tipo AB-A	Segundo grado superficial	Dérmica superficial	Epidermis Dermis papilar	Debería epidermizar espontáneamente en 15 días, pueden quedar secuelas estéticas, y si se complica puede profundizar
Tipo AB-B	Segundo grado profundo	Dérmica profunda	Epidermis Dermis papilar Sin afectar faneras profundas	Habitualmente termina con injertos con secuelas estéticas y/o funcionales. Puede requerir escarectomía tangencial
Tipo B	Tercer grado	Espesor total	Epidermis Dermis Hipodermis hasta musculo y hueso	Necesita escarectomía precoz y aplicación de injertos o colgajos

Fuente: tomado de (Lobos, 2024)

- Riesgos de pérdida de audición

Se genera al producir de la explosión del arco eléctrico que pueden llegar una intensidad de ruido de 165 dB, el ser humano según la OMS un nivel de 55dB en condiciones normales sin molestias, si pasa el umbral de 120dB se genera dolor.

Figura 6*Niveles de ruido en dB***SALUD Y NIVELES DE RUIDO***Nota.* Tomado de (FiraGran, 2018)

- Riesgo a inhalación de humos tóxicos

Debido a la emisión de energía incidente que genera altas temperaturas, los materiales se vaporizan que pueden ser tóxicos para el personal que no cuenta con su EPP.

Figura 7*Arco eléctrico con emisión de gases tóxicos**Nota.* Tomado de (Tecs, 2020)

- Riesgos a lesiones oculares

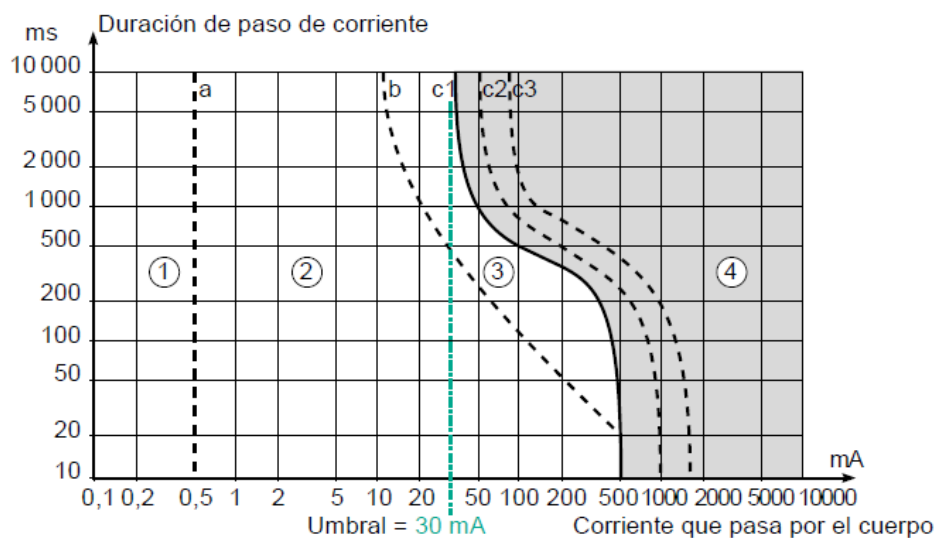
Al producir la explosión de arco eléctrico y la presión que es generado se liberan cuerpos extraños, metales en pequeños tamaños loque causan las lesiones a la vista, debido a que viajan a velocidades altas se penetran a la vista y pueden ser extremadamente graves.

- Riesgo de choque eléctrico

Debido a que el trabajador podría ser parte de un circuito al tocar fuentes energizadas puede sufrir una descarga eléctrica que dependiendo la intensidad de corriente y el tiempo causan daños al cuerpo humano.

Figura 8

Zonas y umbrales de choque eléctrico



Zona 1: percepción

Zona 2: gran malestar y dolor

Zona 3: contracciones musculares

Zona 4: riesgo de fibrilación ventricular (paro cardíaco)

C₁: probabilidad 5%

C₃: probabilidad > 50%

Nota. Adaptado de la (IEC-60479, 2007)

Perceptible. *“Por lo general, en este rango aún no se generan efectos fisiológicos perjudiciales. En esta etapa pueden presentarse contracciones musculares o leves episodios de tetanización”.* (IEC-60479, 2007)

Se tiene zonas y umbrales que depende de intensidad de la corriente y la duración del tiempo.

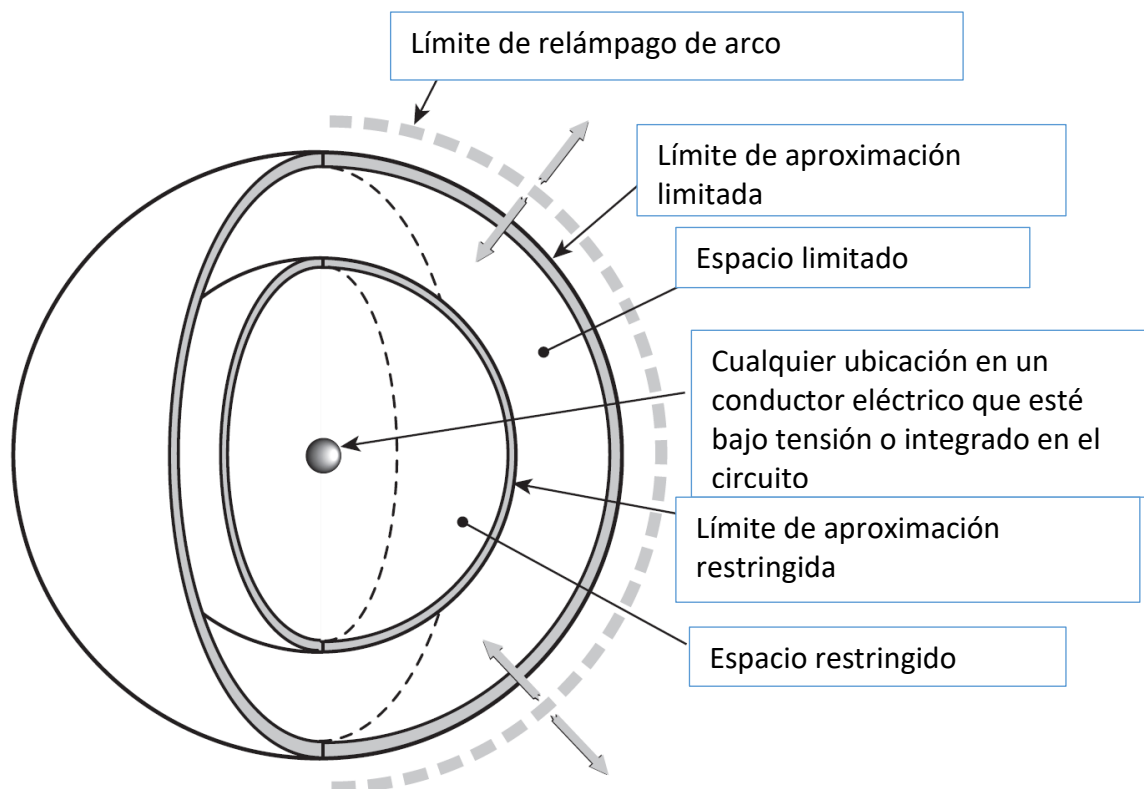
- Zona 1: generalmente no se observa ninguna reacción.
- Zona 2: normalmente no hay efectos fisiológicos peligrosos.
- Zona 3: habitualmente no causa daño orgánico. Si se prolonga más de 2 segundos, pueden ocurrir contracciones musculares que dificultan la respiración y así como interrupciones momentáneas en la actividad cardíaca sin llegar a causar fibrilación ventricular.
- Zona 4: existe el riesgo de paro cardíaco debido a fibrilación ventricular, paro respiratorio o quemaduras severas.
- Umbral de percepción: es la mínima corriente que genera una sensación en una persona cuando pasa a través de ella.
- Umbral de reacción (curva a): es la corriente mínima que causa una respuesta muscular.
- Umbral de no soltar (curva b): es el límite de corriente que permite a un individuo liberar los electrodos que está sosteniendo.
- Umbral de fibrilación ventricular (curva c): es la menor corriente que puede inducir fibrilación ventricular.

2.1.7 Frontera de protección contra arco eléctrico

La normativa NFPA 70E establece tres límites de descarga eléctrica para asegurar la protección al trabajar con equipos energizados. Además, únicamente el personal capacitado puede atravesar estos límites usando el EPP correspondiente.

Figura 9

Límites o fronteras de aproximación



Nota. Tomado de (NFPA-70E, 2018)

a. La frontera de protección de arco eléctrico.

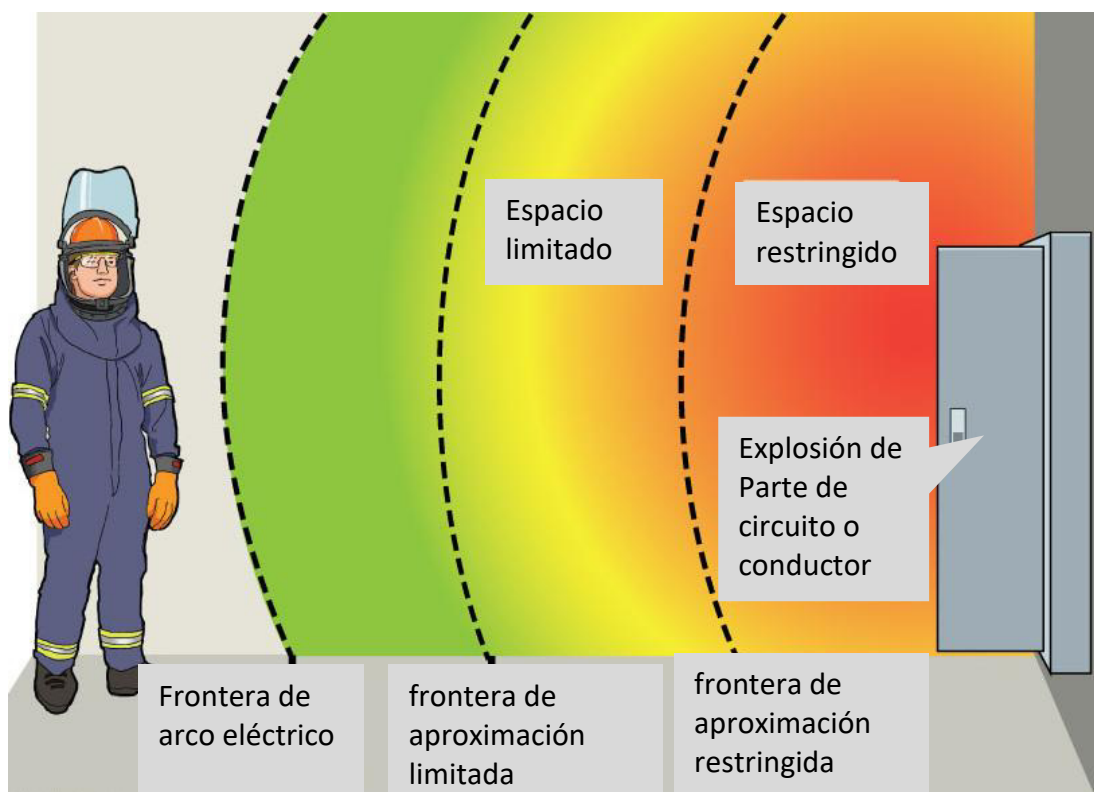
Según la (NFPA-70E, 2018) indica que, *“ante la posibilidad de arco eléctrico, hay un límite de proximidad al arco a partir del cual la energía incidente alcanza los 5 J/cm^2 ($1,2 \text{ cal/cm}^2$)”*.

b. La frontera de aproximación limitada

Se trata de *“un límite de proximidad permitido a un punto energizado de un conductor o una parte de un componente bajo tensión, donde existe el riesgo de choque”*. (NFPA-70E, 2018).

c. La frontera de aproximación restringida.

“Una distancia de seguridad a un punto de un componente eléctrico expuesto o elemento bajo tensión donde se eleva el riesgo una descarga eléctrica debido al arqueo combinado con movimientos no intencionales” (NFPA-70E, 2018)

Figura 10*Limites o fronteras de aproximación**Nota.* Tomado de (Brady, 2024)

En la **Tabla 2** se muestra los puntos de acercamiento a elementos bajo tensión, establecidas para la protección ante choques eléctricos.

Tabla 2*Distancias mínimas de trabajo*

Rango de la tensión nominal del sistema fase a fase	Frontera de Aproximación Limitada		Frontera de Aproximación Restringida contempla la adición de movimiento inadvertido (m)
	Conductor móvil expuesto (m)	Parte del circuito fija expuesta (m)	
< 0.050 KV	No especificado	No especificado	No especificado
0.050 kV - 0.30 kV	3	1	Evitar el contacto
0.301 kV - 0.750 kV	3	1	0.3
0.751 kV - 15 kV	3	1.5	0.7
15.1 kV - 36 kV	3	1.8	0.8
36.1 kV - 46 kV	3	2.5	0.8
46.1 kV - 72.5 kV	3	2.5	1
72.6 kV - 121 kV	3.3	2.5	1
138 kV - 145 kV	3.4	3	1.2
161 kV - 169 kV	3.6	3.6	1.3
230 kV - 242 kV	4	4	1.7
345 kV - 362 kV	4.7	4.7	2.8
500 kV - 550 kV	5.8	5.8	3.6
765 kV - 800 kV	7.2	7.2	4.9

Nota. Tomado de la (NFPA-70E, 2018), Tabla 130.4(D).

2.1.8 Normativa y estándares

La NFPA 70E, perteneciente a la Asociación Nacional de Protección contra Incendios en los Estados Unidos, junto con el estándar IEEE 1584 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, representan normativas fundamentales en el campo de la seguridad eléctrica, además de las regulaciones OSHA y NESC C2 2017.

a) Norma OSHA 29 1910

La normativa OSHA 29 se refiere a la Parte 29 del Código de Regulaciones Federales (CFR), que contiene las normativas de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) del Departamento de Trabajo de los Estados Unidos. Específicamente, la normativa de OSHA se encuentra en la Parte 1910 del Título 29

del CFR, que abarca las regulaciones sobre seguridad y salud ocupacional en el lugar de trabajo.

Estas regulaciones cubren una amplia gama de temas, como:

- 1910 Sub parte I, Equipo de protección personal
 - 1910.137, Equipos de protección eléctrica
- 1910 Sub parte R, Industrias especiales
 - 1910.269, Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica
- 1910 Sub parte S, Eléctrico
 - 1910.302, Sistemas de utilización eléctrica
 - 1910.303, General
 - 1910.304, Dimensionamiento y protección de cables
 - 1910.305, Técnicas de instalación de cables, elementos y equipos de aplicación general
 - 1910.306, Elementos e instalaciones de función específica (Hallé, 2020)

Las normas de la OSHA que regulan los peligros eléctricos en el lugar de trabajo están diseñadas para proteger a todos los trabajadores, sean o no electricistas, frente a riesgos eléctricos graves como choques eléctricos, arcos eléctricos, explosiones y otros incidentes peligrosos. Estas normativas abarcan una amplia gama de prácticas de seguridad, centradas en la prevención de accidentes y lesiones, y se implementan a través de varias disposiciones clave:

- Uso de Equipos de Protección Personal (PPE): OSHA exige el uso de equipos adecuados como guantes aislantes, gafas de seguridad y ropa resistente a llamas, dependiendo de los riesgos eléctricos presentes en el entorno laboral. Esto es fundamental para proteger a los trabajadores que manipulan o están en contacto con equipos eléctricos.
- Capacitación en Prácticas Seguras: Los empleadores deben garantizar que los trabajadores reciban capacitación específica para reconocer y evitar peligros eléctricos. Esta capacitación incluye cómo trabajar de manera segura cerca de instalaciones

eléctricas y cómo responder en caso de una emergencia eléctrica.

- **Procedimientos de Bloqueo y Etiquetado (Lockout/Tagout):** Este proceso es fundamental para garantizar que cualquier equipo o maquinaria eléctrica no se active accidentalmente mientras está siendo reparado o mantenido. La normativa de OSHA exige procedimientos estrictos para desconectar y bloquear adecuadamente las fuentes de energía antes de cualquier intervención.
- **Mantenimiento de Registros y Documentación:** Es obligatorio que las empresas mantengan un registro detallado de los procedimientos de seguridad implementados, así como de los incidentes relacionados con peligros eléctricos. Estos registros ayudan a garantizar la responsabilidad y la mejora continua de las medidas de seguridad.
- **Inspecciones y Mantenimiento Regular de Equipos Eléctricos:** OSHA exige que los equipos eléctricos sean inspeccionados y mantenidos de manera regular para asegurar que funcionen de manera segura y que se reduzcan las probabilidades de fallos que puedan causar accidentes.

Según (Hallé, 2020) menciona que el cumplimiento de las normas de OSHA es esencial para asegurar prácticas laborales seguras y evitar sanciones significativas por infracciones de seguridad eléctrica. Estas normativas exigen el uso de equipos de protección personal (PPE) adecuados, capacitación sobre riesgos eléctricos y prácticas seguras, como el procedimiento de bloqueo y etiquetado (lockout/tagout). Los empleadores deben evaluar los riesgos eléctricos, implementar medidas de control, y mantener registros detallados de los procedimientos de seguridad y de cualquier incidente, asegurando la conformidad y mejorando la seguridad a largo plazo.

b) norma NESC C2

La norma NESC C2 2017 (National Electrical Safety Code) es un conjunto de directrices y estándares en los Estados Unidos que regula la

seguridad en la instalación, operación y mantenimiento de sistemas eléctricos y de telecomunicaciones. Publicada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), su objetivo es proteger tanto a las personas como a los equipos de los riesgos eléctricos y otros peligros asociados a estas instalaciones.

La norma NESC C2 cubre una amplia gama de temas relacionados con la seguridad eléctrica, incluidos:

- **Diseño y Construcción de Instalaciones Eléctricas:** Proporciona directrices para el diseño y la construcción de líneas eléctricas aéreas y subterráneas, así como instalaciones de telecomunicaciones. Esto incluye requisitos de separación, materiales de construcción, y distancias de seguridad para evitar accidentes eléctricos.
- **Protección de los Trabajadores:** Establece las acciones de protección que deben implementarse para resguardar a los trabajadores que instalan, mantienen o realizan reparaciones en líneas y equipos eléctricos, incluidas prácticas seguras para trabajar en alturas y en proximidad a líneas energizadas.
- **Distancias de Seguridad y Espaciamento:** Especifica los márgenes de seguridad requeridos para proteger tanto a los operadores como al público general de los riesgos eléctricos, incluyendo los espacios seguros entre líneas eléctricas y otros objetos o estructuras.
- **Operación y Mantenimiento de Sistemas Eléctricos:** Proporciona guías sobre cómo operar y mantener las instalaciones eléctricas de manera segura, para minimizar riesgos como incendios, cortocircuitos o descargas eléctricas.

c) Norma NFPA 70-E

La NFPA 70E, titulada "Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo", se enfoca en proporcionar directrices para garantizar la seguridad de los trabajadores en entornos eléctricos.

Establece prácticas laborales seguras, clasifica a los trabajadores según su capacitación y experiencia, y ofrece orientación sobre cómo establecer programas de seguridad eléctrica. Además, aborda la evaluación de riesgos relacionados con descargas y arcos eléctricos, incluyendo trabajos en equipos energizados y procedimientos de bloqueo y etiquetado adecuados. La NFPA 70E también establece límites para la proximidad segura a equipos energizados y proporciona pautas para seleccionar el EPP y los dispositivos de protección eléctrica.

d) Estándar IEEE 1584

Por otro lado, el IEEE Std. 1584, conocido como " Documento de Referencia para Cálculos de Riesgo por Arco Eléctrico ", se centra en calcular la energía liberada durante un arco eléctrico y los límites seguros para sistemas de corriente alterna trifásica. Este estándar se basa en datos empíricos recopilados a partir de pruebas de laboratorio y ofrece una metodología más precisa para evaluar el riesgo de arcos eléctricos. A diferencia de la NFPA 70E, el IEEE 1584 busca evitar la sobreprotección de los trabajadores al proporcionar cálculos más realistas y precisos de la energía incidente, lo que puede evitar restricciones innecesarias en la visibilidad y el movimiento de los trabajadores, así como reducir la incomodidad y aumentar la productividad.

La principal diferencia entre la NFPA 70E y la IEEE 1584 radica en el enfoque de cálculo de la energía incidente durante un arco eléctrico. La NFPA 70E tiende a ser más conservadora en sus estimaciones, mientras que el IEEE 1584 se basa en datos empíricos para ofrecer cálculos más realistas y evitar la sobreprotección de los trabajadores. (Meneses & Montes de Oca, 2018).

Según las ecuaciones de la IEEE 1584-2018, guía para el cálculo del riesgo de relámpago de arco donde se estima la frontera de la energía incidente y de relámpago de arco eléctrico.

La metodología de este estándar está basada en análisis estadísticos que aplica para sistemas según el rango de tensión.

Para sistemas que estén en el rango de $600\text{ V} < V \leq 15\,000\text{ V}$

Para sistemas que estén en el rango de $208\text{ V} \leq V \leq 600\text{ V}$

Para esta investigación se tomará el método de cálculo de media tensión, el software ETAP ya tiene implementado por lo que se tiene que en cuenta cuando se realiza las configuraciones.

Los pasos mencionados en el estándar IEEE1584-2018 son 11 y se describen a continuación.

Paso 1: recopilar los datos del sistema y de la instalación

Se debe registrar datos del sistema eléctrico como diagramas unifilares, curvas de tiempo y corriente e incluso cortocircuitos modelados por computadora actualizados. Además, dependiendo del tipo de instalaciones se podría hacer verificaciones en las propias instalaciones.

Paso 2: Definir escenarios de operación del sistema

“Las instalaciones pueden tener varios escenarios de operación por lo que es relevante determina la corriente de cortocircuito disponibles para los distintos modos que pueda tener la instalación eléctrica. Con esto se podrá determinar las corrientes mínimas y máximas” (IEEE-std-1584, 2018).

Estos modos de operación pueden incluir la activación de uno o varios alimentadores de la empresa de servicios, el estado abierto o cerrado del interruptor de circuito en la subestación de interfaz, o la conexión de una subestación de unidad con uno o dos alimentadores primarios. También pueden implicar una subestación de unidad que utilice dos transformadores con el enlace secundario abierto o cerrado, un centro de control de motores con alimentadores activos o generadores con el suministro de la empresa de servicios o en *stand by*. Las configuraciones de conmutación estándar del sistema pueden ajustarse para manejar la máxima o mínima capacidad de megavoltios-amperios de falla, mientras que las fuentes derivadas, como generadores, pueden operar con la capacidad máxima en línea o con el número mínimo requerido. Finalmente, un estado de apagado o arranque, con todas las cargas inductivas detenidos, reduciría la suma de fallas al mínimo. (IEEE-std-1584, 2018)

Paso 3: Definir las corrientes de falla asociadas

Para llevar a cabo el análisis de arcos eléctricos, es necesario contar con un estudio de cortocircuito actualizado en sus distintas modalidades de operación. Es importante considerar las diversas fuentes de corriente de cortocircuito, como generadores, motores y otros suministros. Esto se debe a que tanto las corrientes de cortocircuito elevadas como las más bajas pueden generar energías de arco eléctrico más significativas.

Paso 4: Determinar el espacio típico y el tamaño del gabinete según los voltajes del sistema y las clases de equipos

Los equipos incluidos en el estudio, así como su voltaje y tipo, pueden servir para definir los espacios típicos entre conductores. Sin embargo, estos espacios pueden ser complicados de medir o obtener del fabricante. Los valores del encerramiento de la tabla 3 fueron usados para las pruebas de laboratorio para determinar el arco eléctrico los cuales son típicos, y se pueden usar dimensiones reales con información del fabricante.

Tabla 3*Clases de equipos y separaciones de bus típicas*

Clases de equipamientos	Separación de barra típicas(mm)	Dimensiones de encerramiento Altura x Ancho x profundidad
15 kV Switchgear	152	1143 mm × 762 mm × 762 mm
15 kV MCC	152	914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm
5 kV Switchgear	104	914.4 mm × 914.4 mm × 914.4 mm
5 kV Switchgear	104	1143 mm × 762 mm × 762 mm
5 kV MCC	104	660.4 mm × 660.4 mm × 660.4 mm
Low-voltage switchgear	32	508 mm × 508 mm × 508 mm
Shallow low-voltage MCCs and panelboards	25	355.6 mm × 304.8 mm × ≤203.2 mm
Deep low-voltage MCCs and panelboards	25	355.6 mm × 304.8 mm × ≤203.2 mm
		355.6 mm × 304.8 mm × ≤203.2 mm
Cable junction box	13	o 355.6 mm × 304.8 mm × >203.2 mm

Nota. Datos tomados de (IEEE-std-1584, 2018)

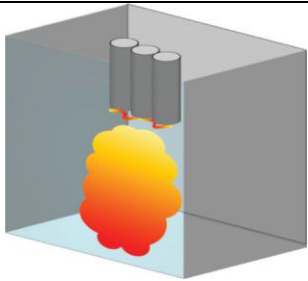
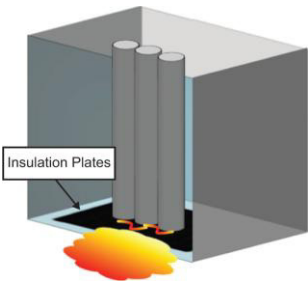
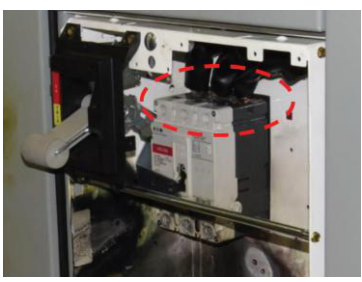
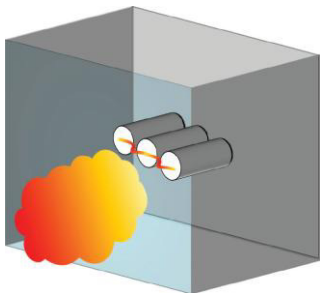
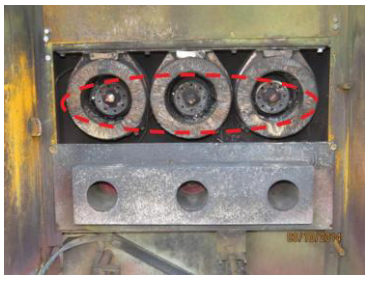
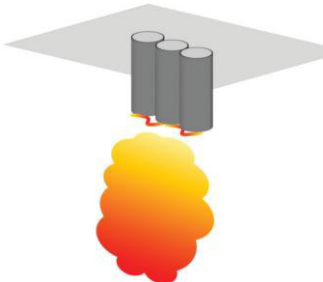
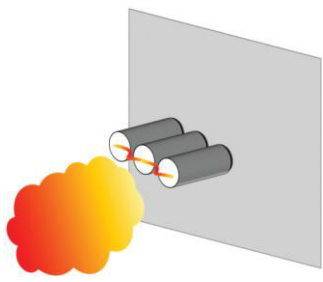
Paso 5 Definir el arreglo de las barras

Como paso siguiente de cálculos se deben de considerar la identificación de los conductores y el envolvente del equipo que se asemeje a la configuración real de los electrodos.

El estándar proporciona los siguientes arreglos:

- VCB: Conductores/electrodos verticales al interior de una caja/encerramiento metálico.
- VCBB: Conductores/electrodos verticales terminados en una barrera aislante dentro de una caja/encerramiento metálico.
- HCB: Conductores/electrodos horizontales dentro de una caja/encerramiento metálico.
- VOA: Conductores/electrodos verticales en aire libre.
- HOA: Conductores/electrodos horizontales en aire libre (IEEE-std-1584, 2018).

Tabla 4*Relación entre el equipo utilizado y la disposición de los electrodos*

Tipo de encerramiento	Configuración del electrodo en la prueba	Configuración del electrodo en el equipo
VCB		
VCBB		
HCB		
VOA		
HOA		

Nota. Datos tomados de (IEEE-std-1584, 2018)

Paso 6: Determinar las distancias de trabajo

La protección contra arcos eléctricos “*Normalmente se fundamenta en el nivel de energía que afecta la cabeza o el torso del personal en la zona laboral, en vez de la energía sobre las extremidades superiores.*” (IEEE-std-1584, 2018).

Según el estándar se tiene las siguientes distancias típicas de trabajo en función a la clase de equipo.

Tabla 5

Clases de equipamiento y distancias típicas de trabajo

Clases de equipamientos	Distancia de trabajo (mm)
15 kV Switchgear	914.4
15 kV MCC	914.4
5 kV Switchgear	914.4
5 kV MCC	914.4
Low-voltage switchgear	609.6
Shallow low-voltage MCCs and panelboards	457.2
Deep low-voltage MCCs and panelboards	457.2
Cable junction box	457.2

Nota. Datos tomados de (IEEE-std-1584, 2018)

Paso 7: Cálculo de la corriente de arco

La corriente de arco “*está relacionada con la corriente de falla en cortocircuito, así como con otros elementos de separación de conductores, la disposición de las barras y el voltaje de la red*” (IEEE-std-1584, 2018).

Se considera que la distribución de la corriente de arco entre varias fuentes es equivalente a la distribución de la corriente de falla de cortocircuito entre dichas fuentes. Es fundamental calcular la corriente total de arco en el

punto específico de atención y determinar qué proporción de esa corriente circula a través de los dispositivos de protección situados aguas arriba. *“La cantidad de corriente de arco que atraviesa por el elemento de protección contra sobrecorriente es lo que determina el tiempo que se debe emplear en la determinación de la energía incidente en función de la corriente total de arco del sistema”* (IEEE-std-1584, 2018)

Paso 8: Determinar la duración del arco

El tiempo de permanencia del arco se determina como el tiempo que tardan las fuentes de energía aguas arriba en quitar el suministro de corriente al arco de falla. Generalmente, *“el tiempo de apertura de los elementos de protección de overcurrent está en función del tamaño y/o orientación de la corriente de arco que fluye a través de su equipo de detección de corriente (como transformadores de corriente y relés)”* (IEEE-std-1584, 2018).

Cuando hay múltiples fuentes presentes, la duración del arco se basa en el tiempo que le toma al último elemento de protección abrirse. En situaciones específicas, la duración del arco no depende únicamente del tiempo de disparo del elemento de protección, sino también del tiempo que requiere la energía almacenada para descargarse a través del arco. Ejemplos de esta situación incluyen, pero no se limitan a, fallas cercanas a los terminales de generadores en el lado de línea del interruptor automático del generador. (IEEE-std-1584, 2018).

Paso 9: Calcular la energía incidente

Para elaborar un modelo del sistema de energía, es esencial tener en cuenta la compartimentación del equipo y la ubicación de la falla, ya que esta podría presentarse en el lado de la línea, en el lado de la barra o en el lado de carga. Al calcular la energía incidente en un punto de falla de arco, se debe considerar el tiempo de interrupción del elemento de protección barras arriba del punto donde se produjo la falla. (IEEE-std-1584, 2018).

Paso 10: Determinar el límite del arco eléctrico para todos los equipos

El umbral de arco eléctrico se define como la longitud desde un posible arco eléctrico en la que la energía incidente alcanza 5.0 J/cm^2 (1.2 cal/cm^2) (IEEE-std-1584, 2018).

Paso 11: Precauciones y exenciones de responsabilidad

El estándar sugiere enfoques para realizar el análisis de arco eléctrico, pero no contiene requisitos obligatorios que excluyan métodos alternativos. Por lo que se debe de tomar medidas razonables necesarios para reducir eventos de arco eléctrico

2.1.9 Seguridad eléctrica contra arco eléctrico

La NFPA 70E establece normas y pautas fundamentales para asegurar la seguridad eléctrica en el lugar de trabajo con un propósito principal es proteger a los empleados en frente a los riesgos eléctricos en su entorno de trabajo. La NFPA 70E detalla el EPP necesario para operar dentro del límite de seguridad contra arco eléctrico.

La (NFPA-70E, 2018) define conceptos clave relacionados con los riesgos eléctricos:

- a) Peligro Eléctrico: *“Una situación riesgosa en la que el contacto o el fallo de los equipos puede ocasionar un descarga eléctrica, quemaduras por relámpagos de arco, quemaduras térmicas o daños provocadas por explosiones de arco”* (NFPA-70E, 2018).
- b) Peligro de Choque: *“Una potencial causa de lesiones o daños a la salud vinculada al recorrido de corriente eléctrica a través del cuerpo debido a la cercanía con elementos bajo tensión”* (NFPA-70E, 2018).
- c) Peligro de Relámpago de Arco: La posibilidad de que produzca un riesgo de relámpago de arco aumenta cuando los elementos este bajo tensión se encuentran dentro de equipos que están resguardados o cerrados, siempre y cuando una persona interactúe con el equipo de una manera que pueda desencadenar un arco

eléctrico. *“No se espera que se produzca un incidente de relámpago de arco en condiciones normales, cuando los elementos estén bajo tensión y cerrados han sido ejecutados correctamente”* (NFPA-70E, 2018).

- d) Indumentaria de protección ante relámpago de arco: un conjunto integral de ropa y equipo diseñado para resistir el arco eléctrico, *“cubriendo todo el cuerpo excepto las manos y los pies. Este traje puede estar compuesto por pantalones o un jardinero, una chaqueta (campera o chamarra) o un overol (mameluco), y una capucha estilo apicultor con protección para el rostro”* (NFPA-70E, 2018).
- e) Análisis de la energía incidente: *“es una parte de la evaluación de riesgo por arco que se emplea para anticipar la energía incidente bajo condiciones definidas”* (NFPA-70E, 2018).

Tabla 6*Categorías de equipos de protección personal*

CATEGORÍA RIESGO/PELIGRO	RANGO DE ENERGÍA INCIDENTE	ROPA REQUERIDA
1	Desde 0 cal/cm2 hasta 4 cal/cm2	Vestimenta resistente al arco con resistencia mínimo de 4 cal/cm2. Camisa magna larga, overol, protector facial, Casco, lentes de seguridad, protección auditiva, guantes de cuero, zapatos de cuero con planta aislante
2	Mayor a 4 cal/cm2 hasta 8 cal/cm2	Vestimenta resistente al arco con resistencia mínimo de 8 cal/cm2. Camisa magna larga, overol, protector facial, Casco, lentes de seguridad, protección auditiva, guantes de cuero, zapatos de cuero con planta aislante.
3	Mayor a 8 cal/cm2 hasta 25 cal/cm2	Vestimenta resistente al arco con resistencia mínimo de 25 cal/cm2. Camisa magna larga, overol, protector facial, Casco, lentes de seguridad, protección auditiva, zapatos de cuero con planta aislante.
4	Mayor a 25 cal/cm2 hasta 40 cal/cm2	Vestimenta resistente al arco con resistencia mínimo de 40 cal/cm2. Camisa magna larga, overol, protector facial, Casco, lentes de seguridad, protección auditiva, zapatos de cuero con planta aislante.

Nota. Tomado de la (NFPA-70E, 2018), Tabla 130.7(C)(16).

En la normativa nacional (RESESATE-MEM/DM, 2013), en su artículo 110 que trata sobre el equipo de protección personal contra relámpagos de arco menciona que:

- a) Traje de arco: debe permitir el fácil retiro y tener un nivel de protección adecuado. En caso de usar suministro de aire, las

mangueras y bombas deben ser resistentes a la llama o no inflamables.

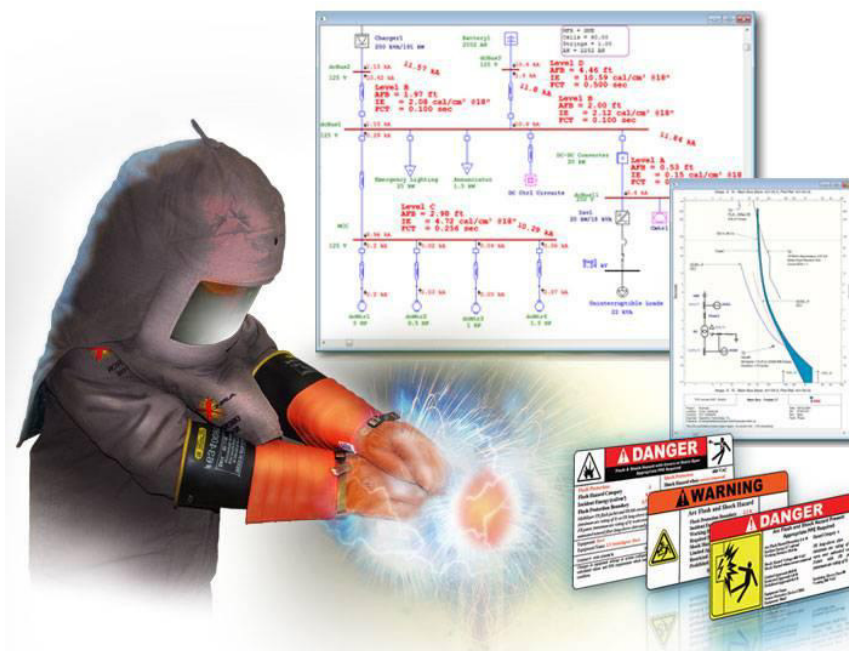
- b) Protección facial: Los protectores faciales deben tener el nivel de protección contra el arco adecuado. Siempre se deben usar protección de ojos debajo del protector facial, y se recomienda iluminación adicional en el área de trabajo.
- c) Protección de manos: se deben utilizar guantes de cuero o resistentes al arco eléctrico. Si se usan guantes de caucho aislante, deben llevar protectores de cuero encima.
- d) Protección de pies: Usar calzado de seguridad de cuero o materiales calificados para el relámpago de arco

2.1.10 Análisis de arco eléctrico usando ETAP

El software ETAP “*es una solución integral diseñada para el análisis y control en el diseño, simulación y operación de sistemas eléctricos de potencia en los sectores de generación, distribución e industrial*” (ETAP, 2023). Cuenta con una variedad de módulos enfocados en el análisis del sistema eléctrico, destacándose entre ellos el módulo especializado en el estudio del riesgo de arco eléctrico.

Figura 11

Módulo de arco eléctrico en software ETAP.



Nota. Datos tomados de (ETAP, 2023).

Al realizar el estudio de arco eléctrico en el programa ETAP y obtener los resultados tras el análisis, es posible generar etiquetas de seguridad que adviertan sobre el peligro de arco eléctrico, autorización de trabajo eléctrico, hojas de datos y evaluaciones relacionadas con el arco eléctrico. Estas etiquetas contienen información crucial para comunicar la magnitud del riesgo asociado con un arco eléctrico, especificando el tipo de EPP requerido en caso de una posible descarga de arco, y resaltando la importancia de mantener las distancias adecuadas respecto a las fronteras y zonas de trabajo (Aguilar Pizarro, 2020).

Para realizar un análisis de arco eléctrico con el software ETAP requiere la entrada de datos como la corriente, voltaje, características del circuito y distancias de seguridad. También se deben tener ciertos estudios y datos previos para garantizar resultados precisos y seguros. Estos son los pasos y estudios previos necesarios:

- Estudio de Corto Circuito: Antes de realizar un análisis de arco eléctrico, es esencial contar con un estudio de corto circuito. Este estudio determinará las corrientes máximas que pueden fluir en el sistema eléctrico en caso de un corto circuito. Los resultados de este estudio son fundamentales para comprender la magnitud del arco eléctrico en diferentes escenarios.
- Estudio de Coordinación de Protecciones: este estudio de evalúa y ajusta los dispositivos de protección, como interruptores y fusibles, para garantizar que se activen de manera adecuada en caso de una falla eléctrica. Esto es importante para reducir los tiempos de desconexión y, por lo tanto, minimizar la energía incidente del arco eléctrico.
- Características del Sistema: Debe tenerse información detallada sobre el sistema eléctrico, incluyendo la configuración de la red, la ubicación de los equipos y la calificación de cortocircuito en varios puntos del sistema.
- Datos del Equipo: Se requieren datos precisos sobre los equipos eléctricos involucrados, como transformadores, interruptores, paneles, y cables. Esto abarca la capacidad de corte y el tiempo de operación del elemento de protección.
- Normativas y Estándares: Es fundamental seguir las normativas y estándares relevantes, como el IEEE 1584 y la NFPA 70E, que proporciona pautas específicas para el cálculo de la energía de arco eléctrico. Cumplir con estas normativas garantiza la seguridad y la precisión del análisis.

Estos estudios y datos previos son esenciales para realizar un análisis de arco eléctrico efectivo y seguro utilizando el software ETAP. Garantizan que los resultados sean confiables y que se puedan tomar las medidas adecuadas para proteger a los trabajadores y las instalaciones eléctricas. (Escobar & Hernández, 2020).

Análisis de arco eléctrico en sistemas de AC y DC en ETAP

En ETAP se puede realizar el análisis de arco eléctrico para sistemas de AC y DC en baja (LV) y sistemas en media tensión (MV).

Características principales son el cálculo de la energía incidente en diversas ubicaciones, junto con la evaluación del peor escenario posible de un arco eléctrico, es fundamental para asegurar la seguridad. Esto incluye la creación de etiquetas de arco eléctrico, hojas de estudio y la emisión de permisos de trabajo.

Además, *“se realiza una evaluación de riesgos para garantizar protección contra choques eléctricos y el uso adecuado de EPP, integrando Star-Auto Evaluation y vistas TCC para identificar fallas operativas causadas por arcos eléctricos”* (ETAP, 2023).

a) Arco Eléctrico en AC

Identifica y evalúa las áreas de alto riesgo de arco eléctrico mediante la simulación y el análisis de diversos métodos de mitigación, proporcionando una flexibilidad mejorada. *“Esto se realiza siguiendo los estándares IEEE 1584-2018 y NFPA 70E, y asegurando la aprobación de los requisitos de EPP. Además, se crean permisos de trabajo eléctricos personalizables y se desarrollan etiquetas de seguridad disponibles en varios idiomas”* (ETAP, 2023).

b) Arco Eléctrico en DC

Determina la energía incidente en aplicaciones de corriente continua para instalaciones críticas, como bancos de baterías en subestaciones.

El software cumple con el Anexo D.5.1 a D.5.3 de la NFPA 70E 2018, permitiendo comparar los valores de energía incidente de arco eléctrico en DC y determinar los resultados más

conservadores utilizando una solución basada en redes y una calculadora de arco eléctrico en DC (ETAP, 2023).

Realiza cálculos de energía incidente y establece límites de protección contra choques eléctricos utilizando métodos como Maximum Power, Stokes & Oppenlander y Paukert, conforme a la NFPA 70E 2018 (Anexo D.5.1 a D.5.3). Cuenta con una potente calculadora gráfica de arco eléctrico en corriente continua, que se integra perfectamente con diagramas unifilares inteligentes y un módulo de cortocircuito en DC. Además, ofrece una integración fluida con el software Star Protective Device y dispone de una extensa biblioteca de dispositivos de protección en DC. Incluye gráficos de energía incidente, etiquetas disponibles en varios idiomas y la capacidad de exportar y generar reportes en MS Excel. Finalmente, presenta un analizador de resultados que permite evaluar el peor caso posible (ETAP, 2023).

Evaluación Automática de Arco Eléctrico

Esta herramienta agiliza el proceso de evaluación al calcular automáticamente los niveles de energía incidente de arco eléctrico en diversas ubicaciones de fallas y generar informes gráficos detallados. *“Ofrece una evaluación automatizada de la energía de arco, establece límites de energía incidente basados en reglas, y analiza los puntos de daño por arco conforme a la norma IEEE C37.20.7”* (ETAP, 2023). Además, proporciona evaluaciones gráficas completas con advertencias y alertas para una gestión más efectiva.

c) Análisis de arco eléctrico en red de 15 kV y superiores **Análisis de Arco Eléctrico en Alta Tensión**

Evaluación de peligros de fallas de arco en sistemas de alta tensión, determinando automáticamente las distancias de trabajo y distancias mínimas de aproximación según el voltaje

del sistema, condiciones de sobretensión transitoria y altitud (ETAP, 2023).

En sistemas que operan a partir de 15 kV, se garantiza el concordancia con las exigencias de OSHA para servicios públicos de transmisión y distribución eléctrica, así como para sistemas de energía renovable. Esto incluye adherirse a OSHA 1910.269 y al Código Nacional de Seguridad Eléctrica (NESC). Se analiza tanto las fallas de arco de fase a tierra (LG), fase a fase (LL) como las trifásicas. Además, se realiza un análisis de arco en caja para equipos cerrados que operan entre 15 kV y 36 kV, siendo aplicable para sistemas desde 1 kV hasta 800 kV (ETAP, 2023).

Falla de arco en aire libre:

Figura 12

Falla de arco en aire libre



Nota. Datos tomados de (ETAP, 2023)

Este sistema es aplicable a rangos de voltaje desde 1 kV hasta 800 kV, cumpliendo con el Apéndice E de OSHA 1910.269 y el Código Nacional de Seguridad Eléctrica (NESC). Incluye modelos para fallas de arco de fase a tierra (LG), fase a fase (LL) y trifásicas, y considera factores de corrección por altitud y sobretensión transitoria. Además, establece distancias mínimas de aproximación y permite personalizar ecuaciones y coeficientes según las necesidades específicas (ETAP, 2023).

Arco en equipos cerrados (arc in a box):

Figura 13

Arco en equipos cerrados



Nota. Datos tomados de(ETAP, 2023)

Este modelo ampliado de arco eléctrico en cajas cerradas proporciona datos de análisis para equipos que operan entre 15 kV y 36 kV.

Incluye espacios típicos y configurables por el usuario entre conductores, así como factores de reflectividad de energía incidente adaptados al tamaño de la caja. Además, ofrece una selección automática de espacios, distancias de trabajo y distancias mínimas de aproximación, y está diseñado específicamente para sistemas de recolección de energía renovable (ETAP, 2023).

Result Analyzer

Permite comparar y filtrar múltiples resultados de análisis de arco eléctrico de diferentes casos en un mismo visualizador para determinar el peor escenario posible (ETAP, 2023).

Este analizador de resultados ofrece múltiples informes y permite la visualización tabular de los resultados de arco eléctrico clasificados por niveles de energía. Además, facilita la exportación de resultados

personalizados a Excel y permite la codificación por colores y el filtrado de resultados según diversas categorías.

Calculadoras de Arco Eléctrico

Este software gráfico de alto rendimiento permite una evaluación rápida de múltiples escenarios "What If" o en lotes, compatible con las normativas IEEE 1584-2018 y IEEE 1584-2002 CL Fuse & Breaker.

Aborda el análisis de arcos eléctricos en corriente continua y de alta tensión, cumpliendo con las regulaciones OSHA y NESC, así como con las normas internacionales BGI/GUV 5188E (alemana) y ENA NENS 09-2014 (australiana).

Ofrece gráficos detallados de resultados de energía incidente, flujo de calor y distancias mínimas de aproximación según NESC-C2-2017. Además, permite definir factores de corrección personalizados y proporciona resultados de límites de AF para exposiciones de energía incidente. Con la capacidad de procesar miles de cálculos con un solo clic, facilita el análisis en lote de múltiples distancias de trabajo para cada ubicación de falla (ETAP, 2023).

2.2 Antecedentes de la investigación

2.2.1 Antecedentes nacionales

Huaynate Sánchez & Nova Diaz (2020), en su tesis titulada “Estudio de arco eléctrico en los centros de control de motores de una planta concentradora de 140000 tn/día ubicado A 4200 m.s.n.m. para la implementación de medidas de seguridad del personal y equipos” llevaron a cabo un análisis de arco eléctrico utilizando el software ETAP. Sus resultados muestran que los niveles de energía incidente y de riesgo no son constantes, sino que pueden variar debido a diversos factores. Recomiendan realizar un análisis de arco eléctrico cada cuatro años para evaluar su impacto frente a los cambios en la configuración del sistema de eléctrico y las variaciones del nivel de potencia de cortocircuito en el punto de conexión al SEIN.

Neyra Vela (2020), en su tesis titulada “Análisis de riesgos eléctricos en el sector minero –Cusco 2019” menciona que en todos los tipos de instalaciones eléctricas tienen riesgos inherentes que pueden reducir la seguridad o la salud de las personas, como descargas eléctricas y arcos eléctricos, riesgos que pueden reducirse si todas las instalaciones se revisan cuidadosamente mediante investigaciones prácticas sobre arcos eléctricos y descargas eléctricas. , y apuntan a utilizar sistemas de protección con la capacidad de eliminar errores en un corto período de tiempo.

La evaluación de seguridad eléctrica indica que la generación de energía incidente no es directamente proporcional al nivel de tensión. Es necesario implementar medidas de control para equipos. De acuerdo con las normas NFPA 70E e IEEE 1584, se sugiere aplicar una jerarquía de controles que incluya medidas de ingeniería, capacitación y concientización de los empleados, así como el uso de equipos de protección específicos para minimizar los riesgos de accidentes eléctricos.

Siu Yupanqui (2018), en su tesis titulada “Determinación y evaluación del arco eléctrico para la implementación de procedimientos y seguridad del personal que labora en el área eléctrica de una planta concentradora de cobre” menciona que en las empresas es esencial que el personal eléctrico esté debidamente capacitado y cuente con el EPP adecuado al trabajar con Elementos eléctricos, incluyendo tableros de alimentación y MCC

Se enfatiza la necesidad de realizar operaciones y mantenimiento de manera segura y dentro de los límites de capacidad establecidos. La evaluación incluye la verificación de interruptores, asegurando su conformidad con los valores de cortocircuito y la coordinación de protecciones. Se determinan los riesgos vinculados al arco eléctrico mediante la medición de energía incidente, corriente de arco, distancias seguras y fronteras de aproximación, según las normativas "IEEE 1584-2002" y "NFPA 70E-2015", con el fin de implementar medidas de protección y seguridad para el personal de operaciones y mantenimiento eléctrico en la planta concentradora de cobre.

Cristian Nateros (2023), en su tesis “Estudio del arco eléctrico para la elección de los equipos de protección del operador de la subestación Pisco”

concluye en la necesidad de utilizar ropa anti-arco de 50 cal/cm² para tensiones de 4.16 kV y 0.48 kV, resaltando la importancia de la protección personal en entornos eléctricos. Se recomienda realizar ajustes y recalcular el estudio de protecciones para garantizar la eficacia del sistema. Además, se propone medidas inmediatas, como la implementación de relés de protección anti-arco para minimizar la energía del arco eléctrico y reducir los tiempos de despeje de falla, mejorando así la seguridad en las celdas de generación. La identificación adecuada del EPP se destaca, incluyendo la consideración de recomendaciones específicas del estudio, conocimiento de los EPPs y la verificación del etiquetado en los tableros eléctricos. Asimismo, se propone la operación remota de interruptores de potencia de media tensión como una medida para reducir la exposición a posibles arcos eléctricos y garantizar tiempos de despeje adecuados en casos de falla.

Alarcón Mogollón. (2020), En su tesis “simulación de falla por arco eléctrico para evitar accidentes mortales en centrales térmicas” concluye que los cálculos de energía incidente basados en la normativa NFPA 70E-2015 y el estándar IEEE1584-2002 son fundamentales para establecer condiciones de seguridad en entornos con equipos energizados. donde una variación significativa en la energía incidente, desde 0.28 cal/cm² (nivel 1) en baja tensión hasta 91.35 cal/cm² (superior al nivel 4) en media tensión, considerando el peor escenario con las cuatro turbinas en funcionamiento simultáneo. El cumplimiento estricto a las distancias de protección contra arco eléctrico es esencial, oscilando entre 0.23 m en baja tensión y 11.56 m en media tensión en ausencia de EPP. En situaciones donde la energía incidente supera la 40 cal/cm², incluso con EPP de nivel 4, se enfatiza la necesidad de realizar trabajos en instalaciones des energizadas y puestas a tierra visible. Para enfrentar situaciones de alta energía incidente, sugiere la implementación de relés de protección contra arco eléctrico que detecten y extingan el arco en el menor tiempo posible.

2.2.2 Antecedentes internacionales

Aguilar Pizarro. Chile (2020) en su tesis titulada “*Estudio De Arco Eléctrico En Redes Eléctricas Industriales*” menciona que el estudio de arco eléctrico en un Centro de Control de Motores (MCC) del sistema de distribución eléctrica proporciona parámetros para seleccionar la categoría adecuada de EPP, cumpliendo con normativas internacionales como IEEE 1584-2019 y NFPA 70E 2018. A través de simulaciones en el software ETAP, se generan etiquetas de reportes de peligro por arco eléctrico en el MCC, lo que permite determinar el nivel de EPP necesario, así como otros parámetros esenciales como la energía incidente y las fronteras de protección. Además menciona que la falta de normativa específica en Chile, recomendando el uso de las normas internacionales para desarrollar protocolos de seguridad eléctrica y detallar el tipo de EPP según la configuración del sistema (CA o CC).

Vásquez Valdés. Chile (2023), en su trabajo de investigación “*Estudio De Arc Flash Para Categorizar Zonas De Riesgo En La Planta Masisa Mapal*” realiza la recopilación de información detallada sobre transformadores, cargas, protecciones y niveles de cortocircuito en un sistema eléctrico desde 154 kV hasta cargas a 0,4 y 6 kV. Con base en estos datos, mediante simulaciones en ETAP, se calculan los niveles de energía incidente en diversas barras. El estudio concluye que es fundamental equilibrar los niveles seguros de energía incidente y una coordinación efectiva de las protecciones para asegurar tanto la seguridad del trabajador como la continuidad operativa de la planta. Asimismo, se recomienda un análisis exhaustivo de las protecciones, teniendo en cuenta los tiempos de operación y su coordinación, con el fin de optimizar la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico.

Cabello Garcia. España (2020), en su artículo de investigación “*Estudio del Arco Eléctrico (Arc Flash) en centrales nucleares en España*” concluye que es necesario elevar la seguridad en instalaciones eléctricas, no solo por requisitos legales de seguridad industrial y laboral, sino también para resguardar a los trabajadores. El análisis del *Arc Flash* es fundamental para aquellos comprometidos con fortalecer la seguridad de los sistemas eléctricos,

mejorando su disponibilidad, seguridad y confiabilidad. Sin embargo, llevar a cabo un análisis detallado del fenómeno *Arc Flash* no concluye la tarea del prevencionista. Estos estudios deben ser rigurosos, periódicos y programados, dado que las instalaciones eléctricas son sistemas dinámicos fácilmente modificables. Cualquier alteración en el sistema eléctrico provoca cambios en los balances energéticos, las intensidades de cortocircuito y la configuración de las protecciones, generando modificaciones en el sistema y variando la energía incidente en cada punto de la instalación.

Salgado Díaz. Chile (2019), En su estudio de investigación titulado “*Estudio Y Propuesta De Mitigación De Riesgo Por Arco Eléctrico En Planta Celulosa Nueva Aldea*” concluye que el análisis de arco eléctrico en la sala eléctrica N°10-1 destaca riesgos críticos, con niveles de energía incidente peligrosamente altos en CDP, CCM, switchgear y Drice AC. La falta de vestimenta protectora para dichos niveles sugiere la urgencia de reducir el riesgo. La propuesta de mitigación logra disminuir significativamente los niveles de energía incidente, especialmente en CDP y CCM, con una variación del 37% al 92% en las barras del sistema. La implementación de esquemas de protección con monitores de arco eléctrico ofrece seguridad y confiabilidad, funcionando solo durante un arco eléctrico y manteniendo prestaciones de protecciones basadas en la seguridad de equipos. La mitigación propuesta ofrece una reducción promedio del 88.6% en CDP y 62.7% en CCM, contribuyendo significativamente a un entorno más seguro.

Escobar Mena & Hernández Nieto. Salvador (2020), en su tesis “Análisis de estudio de arco eléctrico mediante una aplicación web basado en el estándar IEEE 1584-2018” Se realizó un estudio de arco eléctrico conforme a NFPA 70E-2015 y IEEE Std 1584-2018 en una planta generadora y una imprenta universitaria, donde concluye que, en la planta, el bus principal de 4160V es de mayor riesgo (categoría 4 de EPP), mientras que en la imprenta, el tablero general de 240V presenta el mayor riesgo (categoría 3 de EPP), y la mayor corriente en la planta generadora de 34kA y 7.8kA en la imprenta. El estudio de arco eléctrico según IEEE Std 1584 mostró un aumento promedio del 18.16% desde 2002 a 2018, con la mayor variación en la energía incidente (38.22%). además, los requerimientos en base a la NFPA 70E

mostrando el EPP requerido, distancia de trabajo, energía incidente, límite de protección y voltaje.

2.3 Definición de términos

2.3.1 Arco eléctrico

Es un corto circuito que se desarrolla a través del aire y se produce un destello desde un conductor expuesto hasta el otro.

2.3.2 Energía incidente

Es la *“Cantidad de energía impresa sobre una superficie a determinada distancia de la fuente generado durante un evento de arco eléctrico”* (NFPA-70E, 2018).

2.3.3 Distancia de trabajo

Es la *“distancia entre un punto de arco eléctrico con la cabeza y el cuerpo de un operario posicionado para realizar los trabajos”* (NFPA-70E, 2018).

2.3.4 Límite de arco eléctrico

Es la *“distancia para el cual la energía incidente es igual a 1.2cal/cm^2 ”* (NFPA-70E, 2018).

2.3.5 Corriente de falla de arco

Es la corriente de falla que está circulando a través del arco plasmático que también es conocido como *arc fault current* o *arc current*.

2.3.6 Dispositivos eléctricos de protección

Es un elemento fabricado para cerrar, aperturar o ambos de uno más circuitos eléctricos ya sea ante una falla eléctrica o corte de energía.

2.3.7 Etiquetas de seguridad

Son hojas impresas donde tendrá toda la información relacionada al arco eléctrico, estarán ubicadas al ingreso o antes del ingreso a áreas donde hay presencia de equipos energizados.

2.3.8 Media tensión

Es la tensión eléctrica que está entre 1 kV y 30 kV.

2.3.9 Baja tensión

Es la tensión eléctrica que esta debajo de 1000 V

2.3.10 Equipo de protección personal

Es la vestimenta completa desde pies a cabeza que el trabajador usará para realizar trabajos eléctricos y este dependerá de las condiciones donde se realizan los trabajos.

2.3.11 Seguridad eléctrica

Comprender los peligros que pueden surgir por el uso de circuitos eléctricos y tomar precauciones para evitar daños y lesiones.

2.3.12 Peligro eléctrico

Es una condición o situación asociado al uso de la corriente eléctrica que tiene el potencial de ocasionar daños o pérdida de la persona o equipos

2.3.13 Riesgo eléctrico

Es la probabilidad que un equipo energizado pueda causar pérdida o daño de las personas y equipos en el área de trabajo.

3 CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

El análisis del riesgo asociado al arco eléctrico (energía incidente y distancia de seguridad) mediante ETAP reducirá la exposición del personal operativo a lesiones térmicas en un 70%, al establecer fronteras de protección y EPP alineados con NFPA 70E.

3.1.2 Hipótesis específicas

- Mayores niveles de energía incidente en la subestación exigirán el uso de EPP, reduciendo las quemaduras en el personal operativo de la mina.
- La determinación de una distancia de seguridad mediante ETAP disminuirá la probabilidad de exposición a arcos eléctricos en zonas críticas.

- La implementación de fronteras de protección basadas en simulaciones ETAP reducirá el acceso no autorizado a áreas con riesgo de arco eléctrico.
- La selección de EPP según la energía incidente calculada mejorara el cumplimiento de protocolos de seguridad del personal.

3.2 Variables

3.2.1 *Variable independiente*

Riesgo asociado al arco eléctrico

3.2.2 *Variable dependiente*

Seguridad del personal operativo

3.2.3 *Operacionalización de las variables*

Tabla 7*Operacionalización de variables*

variables	Definición operacional	Dimensión	Instrumento de medición	indicadores	Escala de medición
Independiente: Riesgo asociado al arco eléctrico	Magnitud del riesgo energético, calculado mediante energía incidente (cal/cm ²) y distancia de seguridad (m) usando ETAP y NFPA 70E..	Energía incidente	Simulación en software ETAP	Nivel de energía	cal/cm2
		Distancia de seguridad	Simulación en software ETAP	Distancia mínima de seguridad	m
		Frontera de protección	Simulación en software ETAP	Área delimitada	m
		Equipos de protección	Simulación en software ETAP y normativa NFPA 70E	Tipo de EPP	Calificación de EPP
Dependiente: Seguridad del personal operativo	Nivel de protección del personal, medido por áreas delimitadas (m ²) y cumplimiento de EPP (NFPA 70E)	Implementación de medidas de seguridad	normativa NFPA 70E	Etiquetas de seguridad	unidades

Nota. Elaboración propia

4 CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área De Estudio

El área de estudio de la presente investigación, se encuentra ubicado en el flanco Occidental de la Cordillera de los Andes, en el distrito de Yanahuanca, provincia de Daniel Alcides Carrión, región de Pasco, a una altitud promedio de 4,490msnm

Figura 14

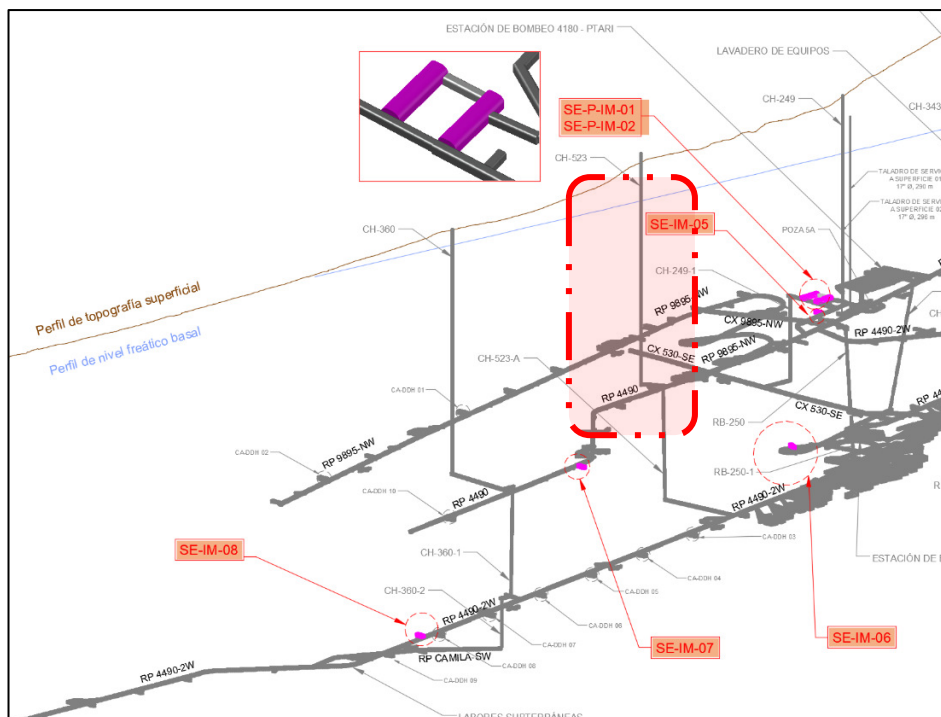
Ubicación de la unidad minera Yumpag.



Nota. Ubicación del proyecto en la unidad minera Yumpag. Tomado de Agnitia Consultores Sac.

Figura 15

Ubicación de las subestaciones en la chimenea 249.



Nota. Chimenea 249 se ubica las dos subestaciones principales de interior mina SE-P-IM-01 y SE-P-IM-02, fue tomado de Agnitia Consultores Sac.

4.2 Diseño de la investigación

Para el presente proyecto de tesis el método de investigación es del tipo aplicada, no experimental, transversal y descriptivo, como se menciona en lo siguiente

Son denominadas aplicadas porque *“se fundamentan en los resultados obtenidos de la investigación básica, pura o fundamental en las ciencias naturales y sociales. A partir de estas, se plantean problemas e hipótesis de trabajo a resolver los desafíos de la vida social en la comunidad regional o del país”* (Ñaupas Paitán, Valdivia Dueñas, Palacios Videla, & Romero Delgado, 2018).

como en la unidad minera se realizará el análisis y mitigación del riesgo eléctrico asociado al arco eléctrico como prevención de accidentes en bienestar de la persona y equipos eléctricos de una empresa y está a la vez es parte del benéfico del país.

En el diseño de investigación del tipo no experimental se “definirse como la investigación en la que no se manipulan de manera intencional las variables, es decir, estudios donde no se alteran deliberadamente las variables independientes para observar su efecto sobre otras variables” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

Además, esto se divide en lo transversal donde “Está orientado a caracterizar las variables y analizar cómo se relacionan e influyen entre sí en un instante determinado, similar a capturar una fotografía de los hechos” (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014), ósea se recolectan información en un solo momento y tiempo único de la unidad minera es el análisis del arco eléctrico en la etapa del desarrollo de la ingeniería en el año 2023.

Finalmente, en la parte descriptiva:

El objetivo es explorar cómo *“las modalidades o niveles de una o varias variables afectan a una población. Este proceso implica identificar a un grupo de personas, otros seres biológicos, elementos materiales, escenarios, contextos, fenómenos naturales y sociales, entre otros, dentro de una o varias variables y ofrecer una descripción”* (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

Entonces en la unidad minera Yumpag, el análisis del arco eléctrico como variable se le atribuyen las características de los parámetros con el fin de reducir los riesgos.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

Subestaciones eléctricas en media y baja tensión ubicadas en el interior de la mina de la unidad minera Yumpag.

4.3.2 Muestra

Subestación eléctrica principal 01 y subestación principal 02 de media tensión 10.0 kV, en el pie de la chimenea 249 en interior mina.

4.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1 *Procedimientos de recolección de información*

En esta investigación, la recopilación de datos para el análisis de arco eléctrico mediante:

Revisión documental

Donde se tendrá que revisar planos de diagramas unifilares del sistema eléctrico, documentos como estudios eléctricos de potencia aguas arriba de las subestaciones eléctricas principales del pie de la chimenea 249, donde estos planos y documentos se definieron en los estudios de ingeniería de detalle realizados en la ingeniería por la unidad minera Yumpag.

Simulación con software ETAP

Con la información de parámetros eléctricos en el Thévenin aguas arriba del pie de la chimenea 249, se realizará simulaciones como el flujo de carga, corto circuito, coordinación de protecciones y finalmente el análisis del arco eléctrico en el software ETAP. Con esta simulación se obtendrán los resultados de la energía incidente, distancias de seguridad, fronteras de seguridad y se determinará la selección de los equipos de protección personal.

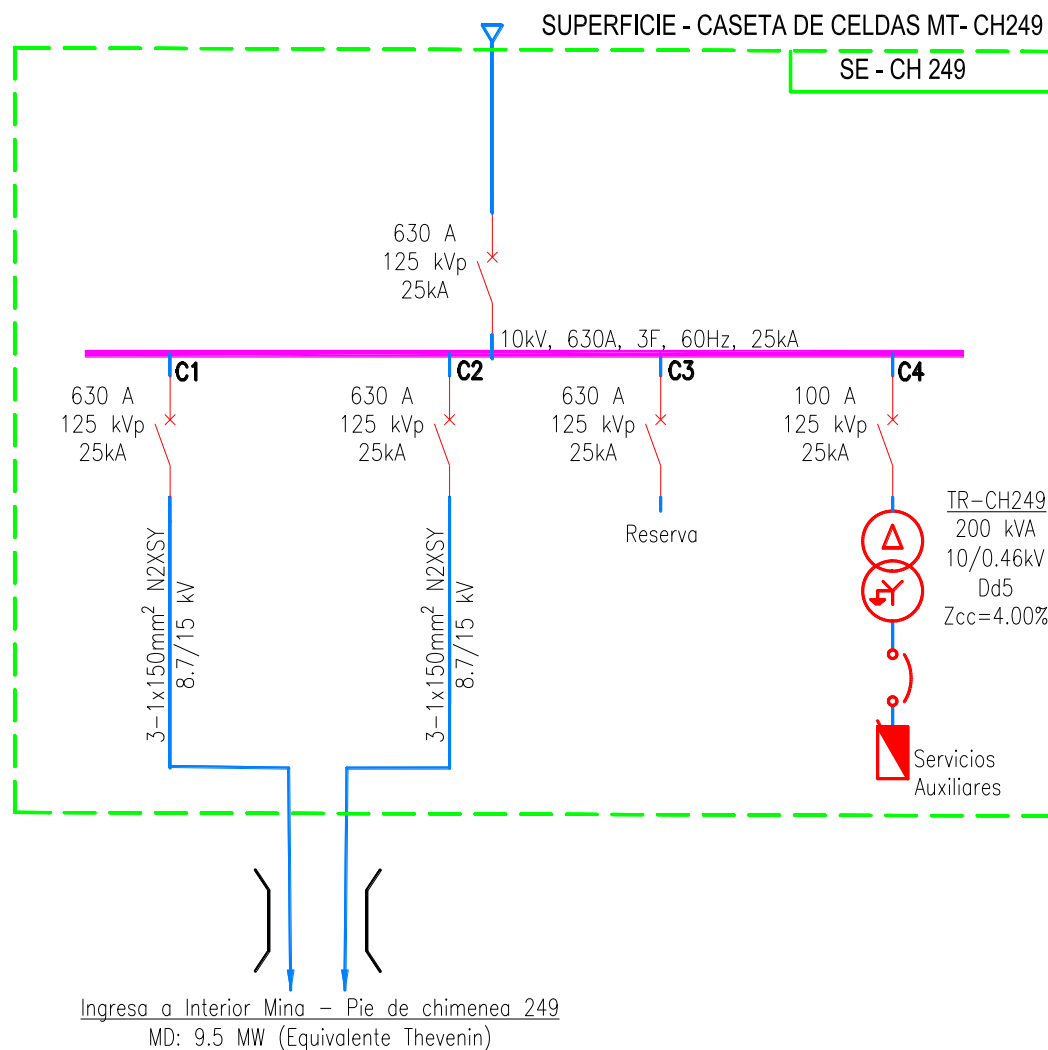
4.4.2 *Técnicas de recolección de información*

En la investigación se obtendrán datos mediante:

Análisis documental

Revisión de los planos de diagramas unifilares, documentos de estudios de potencia desarrollados de la unidad minera Yumpag aguas arriba de la subestación principal y Revisión de normativas.

Diagrama unifilar que muestra el sistema eléctrico aguas arriba de la subestación principal del pie de chimenea 249. Desde el circuito de salida C1 y C2 de la **Figura 16** se toman los datos del Thévenin que es el in put para el software ETAP el cual se muestra en la **Tabla 8**.

Figura 16*Diagrama unifilar aguas arriba de la chimenea 249**Nota.* Elaboración propia**Tabla 8***Datos de Thévenin del sistema eléctrico*

Descripción	Representación	Valor-unidad
Corriente de corto circuito trifásico	I_{3F}	6.861 kA
Potencia de corto circuito trifásica	MVA _{sc}	118.836 MVA
Impedancia de secuencia positiva	X/R	0.75

Nota. Elaboración propia

Las dos subestaciones principales en media tensión tienen transformadores de media tensión que transforma de 10.0/4.16 kV y que en conjunto cada subestación tiene una capacidad de potencia como se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9

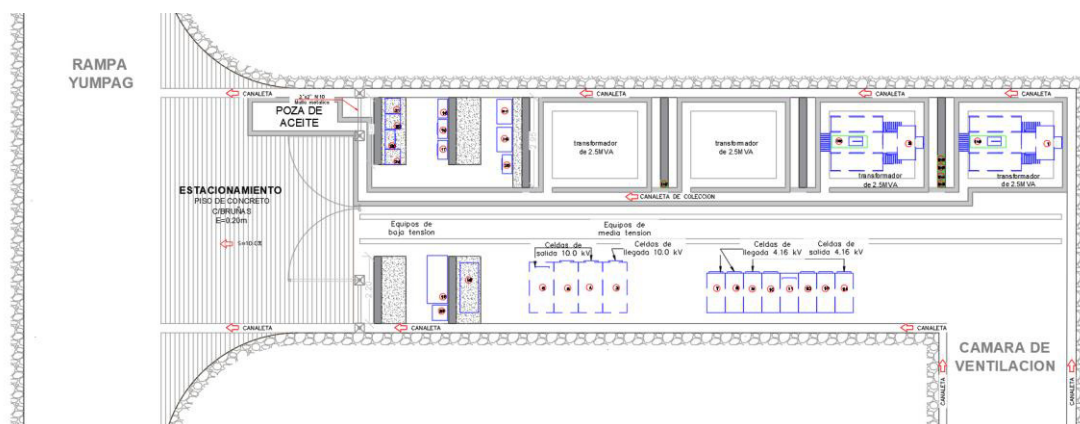
Característica de la subestación eléctrica

Descripción	TAG	Potencia	tensión
Subestación principal interior mina	SE-P-IM-01	10.0 MVA	10.0 kV
Subestación principal interior mina	SE-P-IM-02	4.0 MVA	10.0 kV

Nota. Elaboración propia

Figura 17

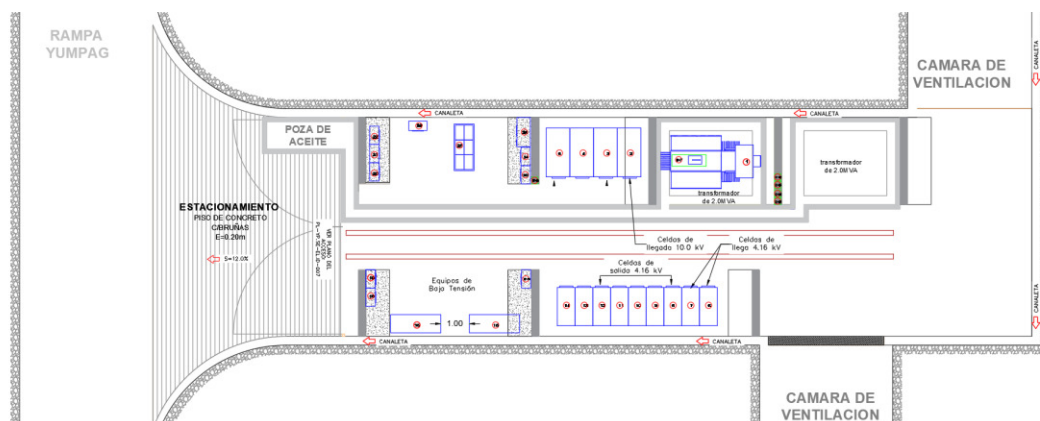
Subestación eléctrica principal SE-P-IM-01



Nota. Elaboración propia

Figura 18

Subestación eléctrica principal SE-P-IM-02



Nota. Elaboración propia.

Las dos subestaciones tienen equipos como se muestra en la **Tabla 10** y en la **Figura 19**.

Tabla 10

Listado de equipos principales en las subestaciones eléctricas

Subestación	Potencia	Transformación
SE-P-IM-01	2.5 MVA	10.0/4.16 kV
SE-P-IM-01	2.5 MVA	10.0/4.16 kV
SE-P-IM-01	2.5 MVA	10.0/4.16 kV
SE-P-IM-01	2.5 MVA	10.0/4.16 kV
SE-P-IM-02	2.0 MVA	10.0/4.16 kV
SE-P-IM-02	2.0 MVA	10.0/4.16 kV

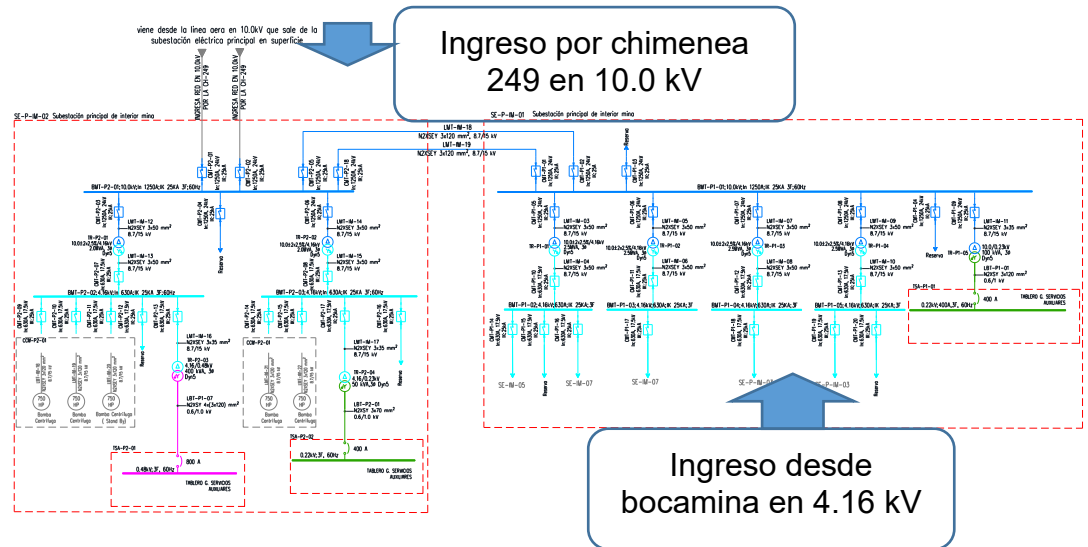
Nota. Elaboración propia

Se tiene dos subestaciones eléctricas principales en el nivel de media tensión de 10.0 kV, su alimentación a esta subestación ingresa por la chimenea 249 desde superficie a interior mina con una altura aproximada de 350 m. esta subestación tiene transformadores que transforman de 10.0/4.16 kV. Desde las celdas de media tensión salen a distribuir a otras subestaciones eléctricas para cargas como bombeo, ventilación y equipos de perforación.

Esta subestación tiene doble alimentación, uno que viene por la chimenea 249 en 10.0 kV y otro que viene alimentado por la bocamina en 4.16 kV formando un anillo según se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19

Diagrama unifilar general de las dos subestaciones eléctricas

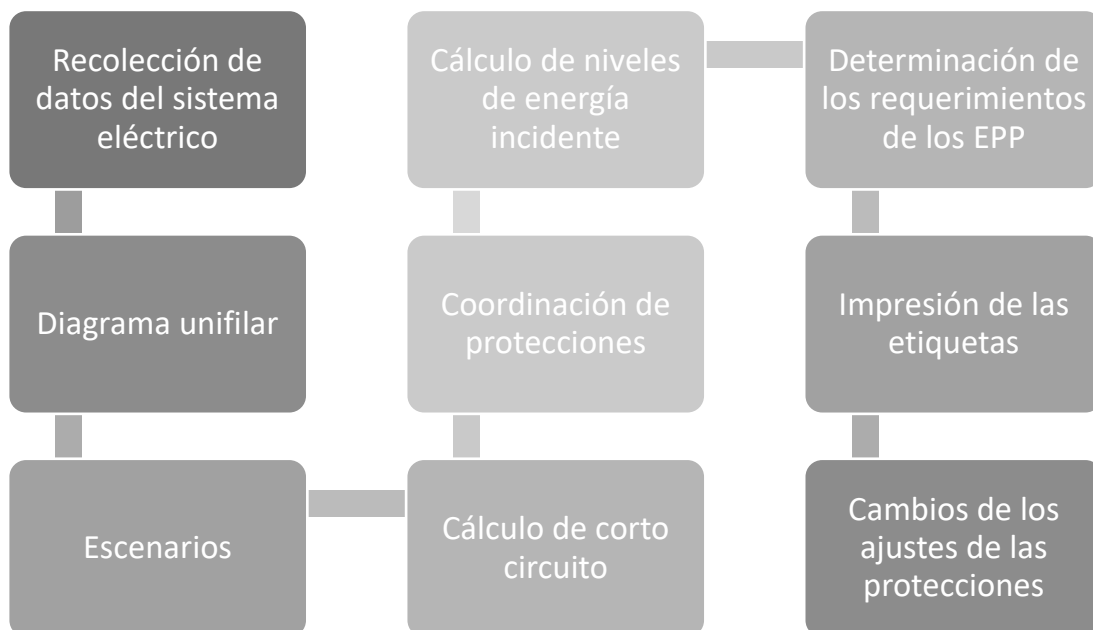


Nota. Elaboración propia

Debido a que es una instalación nueva que entrara en funcionamiento y al ser una subestación principal en media tensión en interior mina se debe de tener en cuenta los riesgos asociados al arco eléctrico.

Simulación y calculo den el software ETAP

Sera la técnica fundamental en la investigación, donde se obtendrán los datos de energía incidente, distancias de seguridad, fronteras de seguridad y se determinará la selección de los equipos de protección personal.

Figura 20*Flujo de trabajo para cálculo del arco eléctrico**Nota.* Elaboración propia**4.4.3 Instrumentos de recolección de información**

En la investigación el instrumento de obtención de datos será en el software ETAP para la obtención de datos de energía incidente, distancias de seguridad y fronteras de seguridad, además, la normativa IEEE 1584 y NFPA 70E para las recomendaciones en selección de equipos de protección personal.

En el software ETAP dispone de un módulo de *arc flash* que nos permite realizar el análisis del arco eléctrico, ante de realizar la corrida mediante el interfaz del ETAP Star se debe de realizar la configurar del caso de estudio y para ello se ingresa al “*Arc flash study case*” según la siguiente **Figura 21** que tienen las siguientes ventanas importantes.

Info: en esta ventana se selecciona las barras donde se realizar la falla de corto circuito.

Figura 21

Configuración del caso de estudio del arco eléctrico

The screenshot shows the 'Arc Flash Study Case' dialog box with the following configuration:

- Study Case ID:** T_AF_3F
- Load Terminal Fault:** ☐ Calc. Load Term. SC
- Transformer Tap:** ☒ Adjust Base kV, ☐ Use Nominal Tap
- 1-Ph/Panel/1-Ph UPS Subsystem:** ☒ 1-Phase, ☒ Panel, ☒ 1-Phase UPS
- Equip. Cable & OL Heater:** Include Impedance for: ☐ MV Motors, ☐ LV Motors
- Report Contribution:** Level: 3
- Motor Contribution Based on:** ☒ Motor Status, ☐ Loading Category, ☐ Both
- Bus Selection:**
 - Fault:** BMT-P1-01, BMT-P1-02, BMT-P1-03, BMT-P1-04, BMT-P1-05, BMT-P2-01, BMT-P2-02, BMT-P2-03
 - Don't Fault:** B-GE-1, B-GE-2, B-GE-4, B-GE-5, B-IM1-1, B-IM1-2, B-IM4-1, B-IM4-2, B-IM6-1, B-IM6-2, B-IM7-5, B-IM7-6, B-IM7-7, B-IM7-8, B-RS-1, B-RS-2, BMT-P3-01, BMT_OTROS PLATAFORMA 3
 - ☐ All Buses, ☐ MV Buses, ☐ LV Buses
 - Buttons: << Fault, ~Fault >>
- Study Remarks:** (Empty text field)
- Buttons:** <, T_AF_3F, >, Copy, New, Delete, Help, OK, Cancel

Nota. Tomado de (ETAP, 2023)

Method: en esta ventana se selecciona el método que se va a utilizar para el análisis del arco eléctrico, en esta sección se usara las ecuaciones que aparecen en el estándar IEEE 1584-2018, ya demás nos da la pasividad de elegir en qué nivel de tensión se va a trabajar el cual será mayor a 600 V por lo que en la subestación eléctrica ene Studio están media tensión.

Además, en esta ventana se elige con que tipo de falla se realizaran los cálculos, en este caso será la falla trifásica simétrica a medio ciclo.

Figura 22

Configuración del método de cálculo del arco eléctrico

The screenshot shows the 'Arc Flash Study Case' dialog box with the 'Method' tab selected. The configuration is as follows:

- Arc Flash Method:**
 - ☒ IEEE 1584-2018
 - ☐ IEEE 1584-2002
 - ☐ ArcFault
- Capacitor Energy:**
 - ☐ Include
- Bus Fault Current:**
 - ☒ Calculate
 - ☒ 3-Phase System
 - ☐ Panel/1-Ph UPS/1-Ph System
 - ☒ Update Ibf to Bus
 - ☒ Max / Min
 - ☐ Max
 - ☐ Min
 - ☒ Symm. 1/2 Cycle
 - ☐ Symm. 1.5 to 4 Cycle
 - ☐ Fault Current Decay
- Motor Contributions:** (Empty section)
- Incident Energy for LV Equipment:**
 - ☐ Incident Energy for LV Equipment
- Update AF Results to Buses:**
 - ☒ Update
 - ☐ No Update
 - ☐ Update if Result is More Conservative
- Bottom Bar:**
 - Navigation: < T_AF_3F >
 - Buttons: Copy, New, Delete, Help, OK, Cancel

Nota. Tomado de (ETAP, 2023)

Parameters: en esta ventana se tiene los parámetros como las distancias de trabajo que se debe de tener hacia los equipos de media tensión y se usara de acuerdo a las recomendaciones del estándar de la IEEE 1584-2018. Además, se va usar según la recomendación de la normativa del *arc*

flash bondary (limite o frontera de arco electro) es la distancia para el cual la energía incidente es de 1.2 cal/cm^2 . los niveles o categorías de la energía incidente se tomas de la recomendación de la normativa NFPA 70E el cual están clasificados en 4 categorías.

Figura 23

Configuración de parámetros para el cálculo del arco eléctrico

The screenshot shows the 'Arc Flash Study Case' dialog box with the 'Parameters' tab selected. The settings are as follows:

- Bus Gap & Working Distance:**
 - ☐ Individual (Bus Editor)
 - ☒ Global (Arc Flash Analysis Data)
 - ☒ Typical IEEE 1584 2018
 - ☐ User-Defined
- Incident Energy Levels:**
 - ☒ NFPA 70E 2012 to 2021 / User-Defined
- System Grounding:** (Empty field)
- Arc Flash Boundary:**
 - ☒ 1.2 cal/cm²
 - ☐ User-Defined
- Shock Risk Assessment:**
 - Shock Protection Boundaries:**
 - ☐ Individual (Bus Editor)
 - ☒ Global
 - ☒ NFPA 70E 2018 to 2021
 - ☐ User-Defined
- Global Voltage-Rated Glove Class:**
 - ☒ ASTM D 120-14a
 - ☐ User-Defined

At the bottom, there is a dropdown menu showing 'T_AF_3F', and buttons for '<', '>', 'Copy', 'New', 'Delete', 'Help', 'OK', and 'Cancel'.

Nota. Tomado de (ETAP, 2023)

Cuando se tiene adecuado la información para el caso de estudio Y y se realice el análisis de arco eléctrico se podrá visualizar resultados en las barras de media tensión, estos resultados se pueden ver ingresando a la

configuración de la barra (bus editor) en cada barra de la subestación eléctrica de media tensión. En las ventanas de bus editor se pueden ver la **Figura 24**.

En esta ventana se tiene información del método que ya se eligió anteriormente que será según el estándar de la IEEE 1584-2018.

- Bus fault current es la corriente de falla en la barra que la falla trifásica de acuerdo al cálculo a 1/2 ciclo (ANSI).
- *Bus arcing current* es la corriente de arco en la barra que va mostrar la corriente de arco trifásico en la barra debido a la corriente de corto circuito a 1/2 ciclo simétrico que ya se definió anteriormente.
- El *Sure PD* es el dispositivo de protección encargado de despejar las fallas en el punto donde se produce el arco eléctrico.
- La corriente de arco del *Sure PD* es aquella que podría superar la capacidad del dispositivo de protección.
- *Fault clearing time* (FCT), es el tiempo que se demora el dispositivo de protección de despejar la falla o el tiempo en que el dispositivo de protección estuvo abierto hasta despejar la falla.
- *Incident energy* es la energía incidente que es calculados según los parámetros que se ingresó previamente al análisis del arco eléctrico y esta expresado en cal/cm², este cálculo se realizó mediante el estándar IEEE 1584-2018.
- *Arc flash boundary* El límite de protección contra arco eléctrico, la distancia a partir de la cual se pierde la protección y se supera una energía de 1.2 cal/cm²
- *Work distance* es la distancia y trabajo que se debe de ingresar para que se realice el cálculo de la energía incidente.

Figura 24

Configuración de a barra para el cálculo del arco eléctrico

Bus Editor - BMT-P1-01

Harmonic | Reliability | Remarks | Comment

Info | Phase V | Load | Motor/Gen | Rating | Arc Flash | Protection

10 kV 1200 Amps | Asymmetrical 37 kA

☐ Disable Update

Method: IEEE 1584-2018

Bus Fault Current: 8.48 kA

Bus Arcing Current (Ia): 7.713 kA

Source PD: CMTP112

Source PD Arcing Current: 1.626 kA

Fault Clearing Time (FCT): 1.253 Sec

Incident Energy: 11.843 cal/cm²

Arc Flash Boundary: 3.933 m

User-Defined: Level D PPE Level

Working Distance: 91 cm

Working Distance LG: cm

User-Defined: Calculator...

Fixed FCT: 0.1 Sec ☐

Alerts

Allowable Energy: 0 cal/cm² | Energy Level:

TCC Plot Energy

☒ C-line ☐ C-area

☒ Ibf ☒ Calculated

☐ Ia

☒ Calculated Energy

☒ Allowable Energy

☒ All Energy Categories

TCC Plot Arcing Current

☒ Calculated kV

☐ User-Defined

☒ Calculated/UD Source PD

☐ User-Defined: 0 kA

OK Cancel

Nota. Tomado de (ETAP, 2023)

5 CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Presentación y análisis de los resultados.

5.1.1 Resultados

Sistema eléctrico interior mina de la unidad minera Yumpag.

La subestación principal en interior mina tiene doble alimentación, uno que viene por la chimenea 249 en 10.0 kV y otro que viene alimentado por la bocamina en 4.16 kV formando un anillo. Entonces para el análisis se considera un escenario el cual será en su estado normal en forma de anillo alimentado por la chimenea 249 y bocamina.

Tabla 11

Resultados de flujo de potencia

Subestación	Bus ID	Nominal kV	Type	% Voltage	MW Loading	Mvar Loading	Amp Loading
SE-P-IM-01	BMT-P1-1	10.0	Load	99.82	1.968	0.612	119.2
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	Load	99.17	0.518	0.222	78.93
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	Load	99.37	0.48	0.137	69.74
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	Load	99.44	0.468	0.105	66.93
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	Load	99.44	0.468	0.105	66.93
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10.0	Load	99.84	4.245	1.679	264
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	Load	97.58	1.37	0.593	212.4
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	Load	98.4	0.893	0.384	137.1

Nota. Elaboración propia

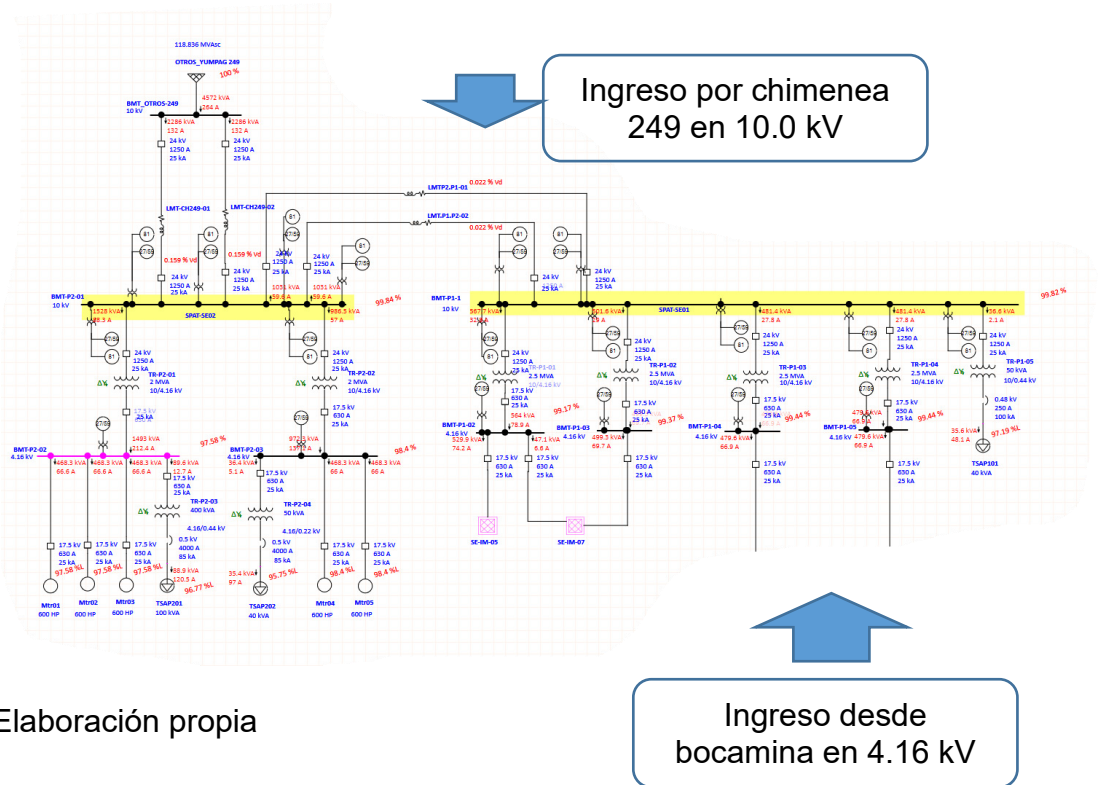
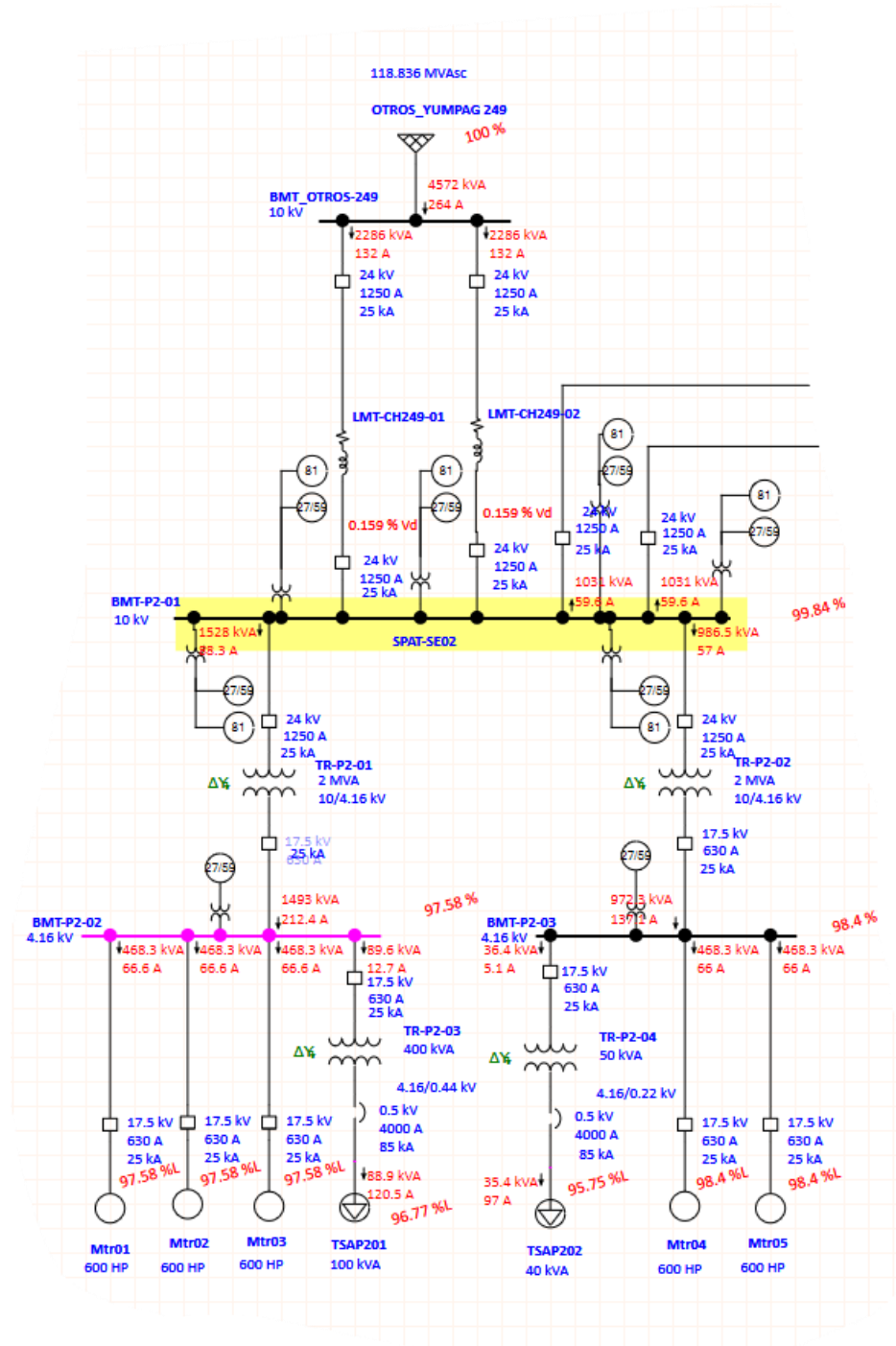
Figura 25*Diagrama unifilar general de flujo de potencia en ETAP*

Figura 26

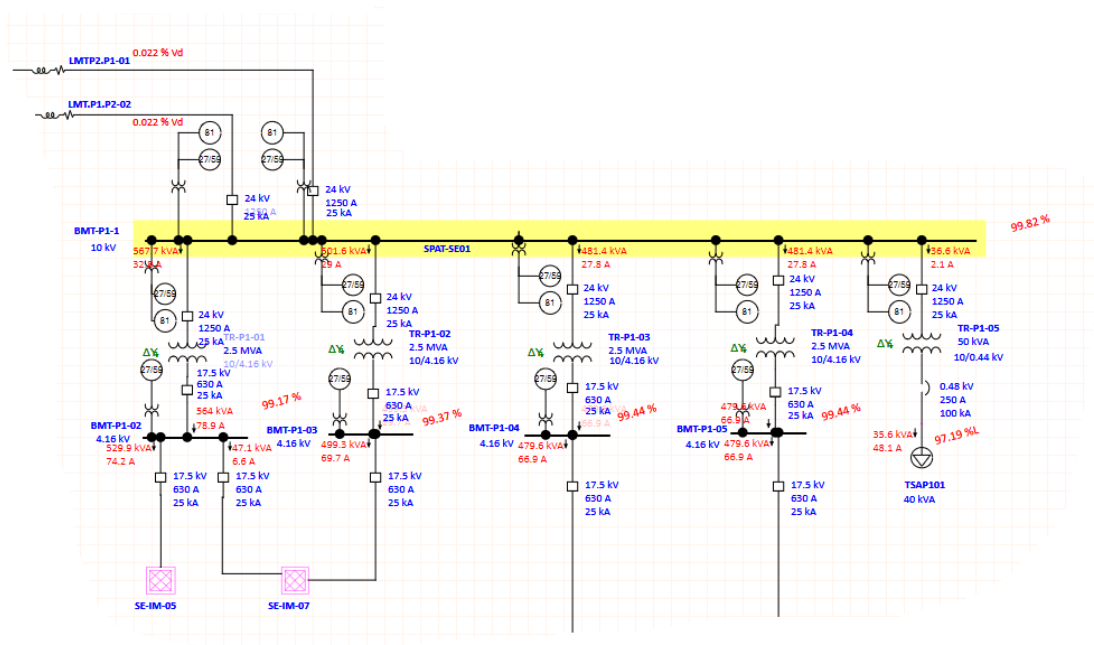
Diagrama unifilar de flujo de potencia en ETAP de SE-P-IM-01



Nota. Elaboración propia

Figura 27

Diagrama unifilar de flujo de potencia en ETAP de SE-P-IM-02



Nota. Elaboración propia

Tabla 12

Resultados de corto circuito

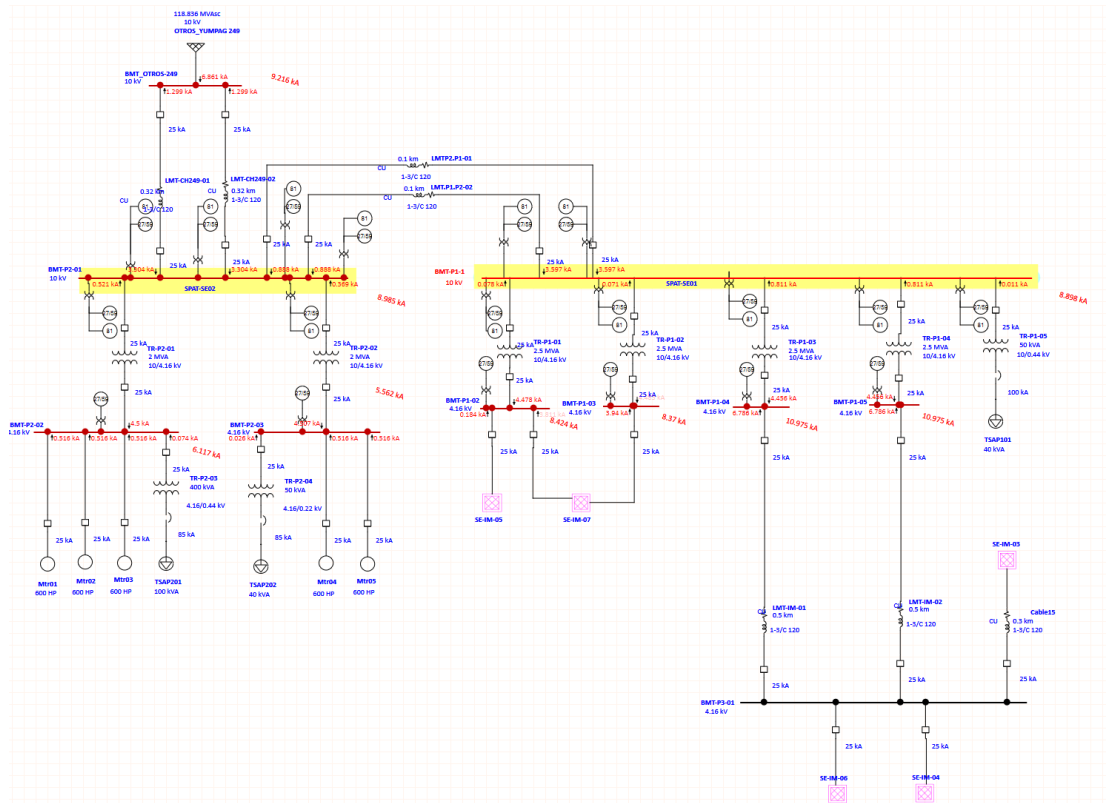
Subestación	ID	Nominal kV	Type	I"k	ip	Ik
SE-P-IM-01	BMT-P1-1	10.0	Switchgear	8.89	14.16	7.95
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	Switchgear	8.42	15.66	7.87
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	Switchgear	8.37	15.54	7.87
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	Switchgear	10.97	18.99	10.43
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	Switchgear	10.97	18.99	10.43
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10.0	Switchgear	8.98	14.31	8.02
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	Switchgear	6.11	12.89	4.46
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	Switchgear	5.56	11.70	4.46

Nota. Elaboración propia

- I"k: Muestra el valor inicial simétrico rms de la corriente de cortocircuito de CA basado en la norma IEC en kA o Amperios.
- Ip: Muestra el valor máximo instantáneo posible de la corriente de cortocircuito disponible en kA o Amperios.
- Ik: Muestra el valor rms de la corriente de cortocircuito en estado estable en kA o Amperios.

Figura 28

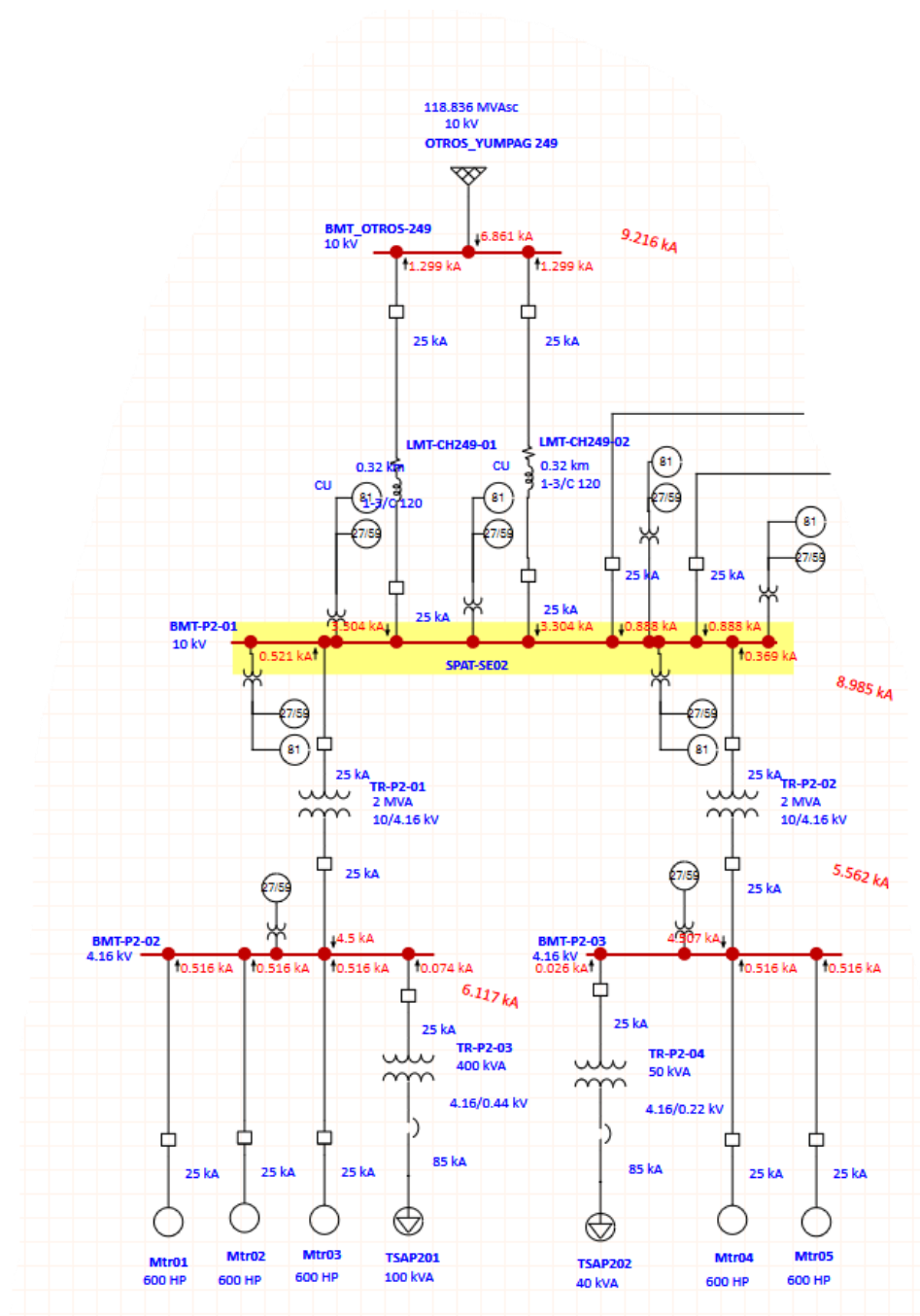
Diagrama unifilar general de corto circuito en ETAP



Nota. Elaboración propia

Figura 29

Diagrama unifilar de corto circuito en ETAP de SE-P-IM-01



Nota. Elaboración propia

BMT-P2-01	RICMTP205	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP202	Overcurrent	Phase	IEC - Very Inverse	0.4	200	0.35	2.5	1250	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP202	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP201	Overcurrent	Phase	IEC - Very Inverse	0.4	200	0.35	2.5	1250	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP201	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP107	Overcurrent	Phase	IEC - Inverse	0.8	400	0.2	4.6	2300	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP107	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP108	Overcurrent	Phase	IEC - Inverse	0.8	400	0.2	4.6	2300	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP108	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP109	Overcurrent	Phase	IEC - Inverse	0.1	50	0.05	0.24	120	0.1 s
BMT-P1-1	RICMTP109	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP203	Overcurrent	Phase	IEC - Inverse	0.6	300	0.2	4.6	2300	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP203	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP206	Overcurrent	Phase	IEC - Inverse	0.6	300	0.2	4.6	2300	0.1 s
BMT-P2-01	RICMTP206	Overcurrent	Ground	Definite Time	2	100	0.2	4	200	0.1 s

Nota. Elaboración propia

Tabla 14

Resultados de energía incidente

Subestación Eléctrica	ID Barra	Nivel Tensión kV	Tipo Equipo	Total, Energy (cal/cm ²)	Energy Levels
SE-P-IM-01	BMT-P1-01	10	Switchgear	11.84	Categoría 3
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	Switchgear	6.24	Categoría 2
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	Switchgear	6.21	Categoría 2
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	Switchgear	1.9	Categoría 1
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	Switchgear	1.10	Categoría 1
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10	Switchgear	9.29	Categoría 3
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	Switchgear	4.38	Categoría 2
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	Switchgear	4.06	Categoría 2

Nota. Elaboración propia

Tabla 15*Resultados de distancia de seguridad y Frontera de arco eléctrico*

Subestación Eléctrica	ID Barra	Nivel Tensión kV	Tipo Equipo	Working Distance LL (cm)	AFB (m)
SE-P-IM-01	BMT-P1-01	10	Switchgear	91.4	3.93
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	Switchgear	91.4	2.61
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	Switchgear	91.4	2.60
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	Switchgear	91.4	1.22
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	Switchgear	91.4	
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10	Switchgear	91.4	3.36
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	Switchgear	91.4	2.08
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	Switchgear	91.4	1.98

*Nota. AFB: Arc flash bondary (Frontera de arco eléctrico), Elaboración propia***Tabla 16***Resultados de las características de equipos de protección personal*

Subestación Eléctrica	ID Barra	Nivel Tensión kV	Tipo Equipo	Glove V-rating (VAC)	Glove Class
SE-P-IM-01	BMT-P1-01	10	Switchgear	17000	2
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	Switchgear	7500	1
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	Switchgear	7500	1
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	Switchgear	7500	1
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	Switchgear	7500	1
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10	Switchgear	17000	2
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	Switchgear	7500	1
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	Switchgear	7500	1

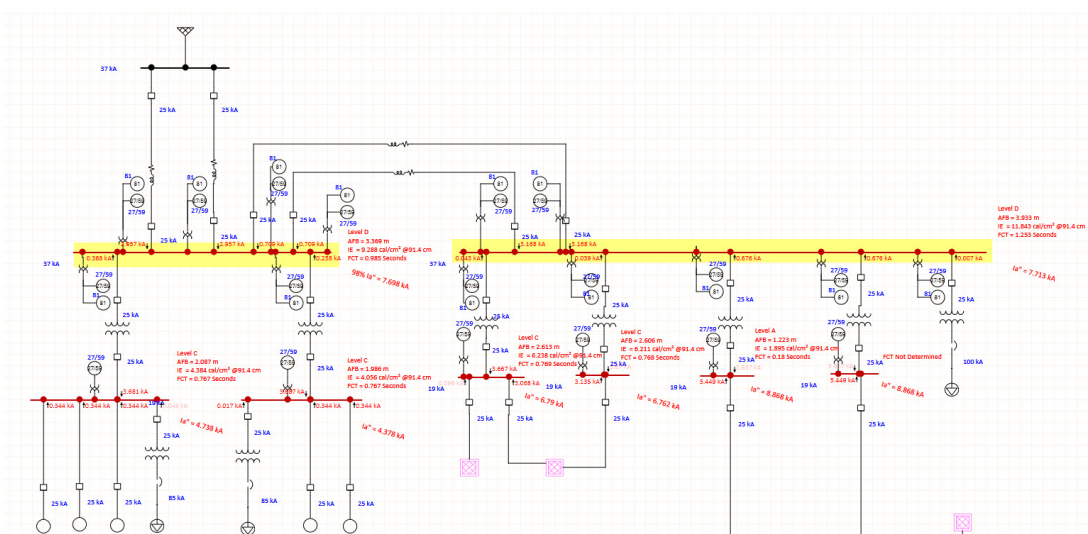
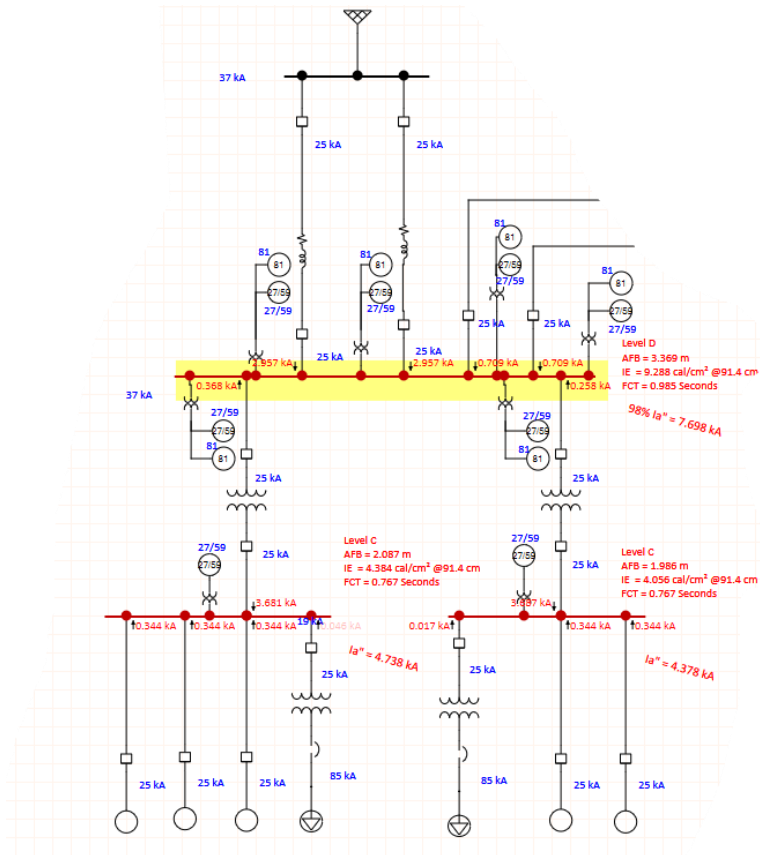
*Nota. Elaboración propia***Figura 31***Diagrama unifilar general de arco eléctrico en ETAP**Nota. Elaboración propia*

Figura 32

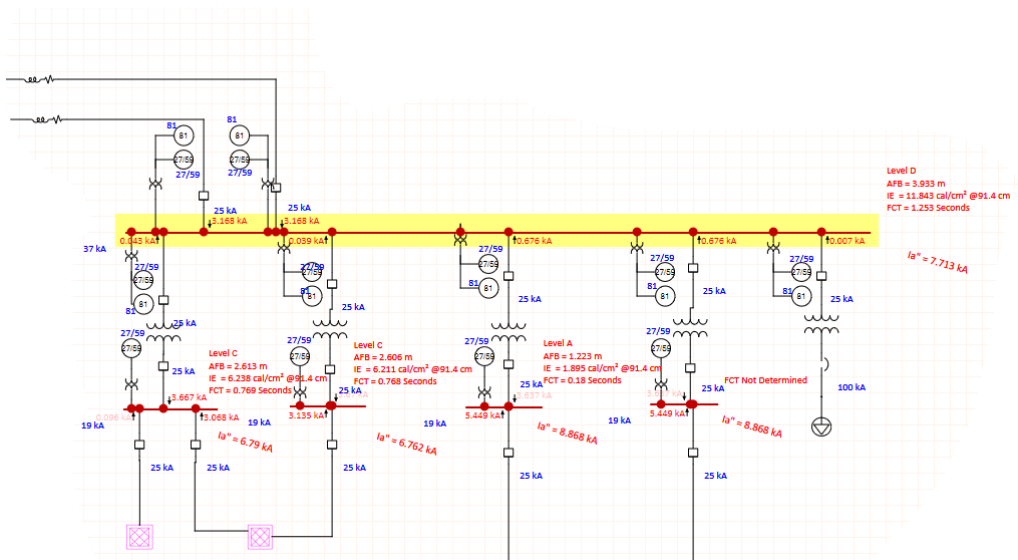
Diagrama unifilar de arco eléctrico en ETAP de SE-P-IM-01



Nota. Elaboración propia

Figura 33

Diagrama unifilar de arco eléctrico en ETAP de SE-P-IM-02



Nota. Elaboración propia

5.1.2 Análisis de resultados

La energía incidente para la subestación principal en interior mina con los códigos SE-P-IM-01 y SE-P-IM-02 en media tensión de 10.0 kV y 4.16 kV Se tiene niveles de energía que están entre los niveles 1, 2 y 3. En las barras con un nivel de tensión de 4.16 kV se tiene menor nivel de energía incidente en comparación de las barras en 10.0 kV. Además, la corriente de falla de arco eléctrico es mayor en las barras de 10.0 kV.

Tabla 17

Resultados de energía incidente y corriente de arco

Subestación Eléctrica	ID Barra	Nivel Tensión kV	Total, Energy (cal/cm ²)	Energy Levels	I _a FCT (kA)	Final FCT (sec)
SE-P-IM-01	BMT-P1-01	10.0	11.84	Categoría 3	7.713	1.253
SE-P-IM-01	BMT-P1-02	4.16	6.24	Categoría 2	6.79	0.769
SE-P-IM-01	BMT-P1-03	4.16	6.21	Categoría 2	6.762	0.768
SE-P-IM-01	BMT-P1-04	4.16	1.9	Categoría 1	8.868	0.18
SE-P-IM-01	BMT-P1-05	4.16	1.10	Categoría 1	8.868	
SE-P-IM-02	BMT-P2-01	10.0	9.29	Categoría 3	7.698	0.985
SE-P-IM-02	BMT-P2-02	4.16	4.38	Categoría 2	4.738	0.767
SE-P-IM-02	BMT-P2-03	4.16	4.06	Categoría 2	4.378	0.767

Nota. Elaboración propia

FCT: Tiempo de despeje de falla (Fault Clearing Time)

I_a: magnitud de la corriente de arco en la ubicación de la falla

Según la **Tabla 17** se tiene las distancias de seguridad y la frontera de arco eléctrico que deben de tener en cuenta cuando se realicen trabajos en las instalaciones de las dos subestaciones eléctricas.

Los EPP se deben usar de acuerdo a nivel de energía incidente calculado, en la siguiente tabla se muestra las características de estos equipos de protección personal que se deben de tener en cuenta para realizar trabajos en las dos subestaciones eléctricas

Tabla 18*Equipos de protección personal en las subestaciones eléctricas*

Categorías	Equipo de protección personal
Categoría 1	Vestimenta resistente al arco: Se recomienda el uso de una camisa de manga larga y pantalones o un mameluco resistente al arco, junto con protección facial adecuada o una capucha del traje protector contra relámpagos de arco. Además, se debe considerar una chaqueta, parka, prendas impermeables o forros para cascos que cuenten con un valor de resistencia al arco. Equipo de protección: Se recomienda utilizar un casco, gafas de seguridad, tapones auditivos, guantes de cuero para uso industrial y calzado de cuero.
Categoría 2	Vestimenta resistente al arco: Es aconsejable utilizar una camisa de manga larga y pantalones, o bien, un mameluco resistente al arco, junto con protección facial adecuada o una capucha del traje contra relámpagos de arco y un pasamontaña con valor de resistencia al arco. Además, se recomienda una chaqueta, parka, prendas impermeables o forros para cascos que tengan resistencia al arco. Equipo de protección: Casco, lentes o gafas protectoras, tapones para oídos, guantes de cuero para trabajo industrial y zapatos de cuero
Categoría 3	Vestimenta resistente al arco: Se recomienda el uso de una camisa de manga larga, pantalones y un mameluco resistente al arco, acompañados de una chaqueta y pantalón de traje. También es esencial llevar una capucha del traje de protección contra relámpagos de arco con un valor de resistencia adecuado y guantes resistentes al arco. Además, se sugiere incluir una chaqueta, parka, prendas impermeables o forros de cascos que ofrezcan resistencia al arco. Equipo de protección: Casco, anteojos o gafas de seguridad, protección auditiva(tapones) y calzado de cuero.

Nota. Elaboración propia

De acuerdo a las simulaciones en software ETAP se obtienen las clases de guantes dieléctricos que deberán de usar, en este caso son obligatorios usar como mínimo de clase 2.

Tabla 19**Clasificación de guantes dieléctricos para las subestaciones**

Subestación Eléctrica	Nivel Tensión kV	Glove V-rating (VAC)	Glove Class
SE-P-IM-01	10	17000	2
SE-P-IM-01	4.16	7500	1
SE-P-IM-01	4.16	7500	1
SE-P-IM-01	4.16	7500	1
SE-P-IM-01	4.16	7500	1
SE-P-IM-02	10	17000	2
SE-P-IM-02	4.16	7500	1
SE-P-IM-02	4.16	7500	1

Nota. Elaboración propia

Los EPP que serán usados en la subestación eléctrica principal en media tensión serán los siguientes y son referenciales según catálogos:

Trajes Anti arco de 12 cal/cm², esto como mínimo que se debería usar en las subestaciones eléctricas.

Figura 34**Traje anti arco****ARC FLASH AND MULTI-RISK LONG SWITCHING JACKET**

Designed to be worn on top of the usual clothing, for short operations (i.e.: power-breaking operations, live working on electrical vehicle batteries...). This long jacket offers the protection required by the French Organism of Live Working.

CAUTION, ONLY THE AREAS COVERED BY THE SWITCHING JACKET ARE PROTECTED.

Reference	Size
AFG-2300-*	S, L, 2XL or 4XL
(*) To be completed by the sizes: S, L, 2XL, 4XL.	

BENEFITS

- An adjustable hood for a better protection of the head and the neck in case of a higher risk, to be wear with a visor or a helmet.
- A Velcro® fastening along the entire length: easy to open and close.
- A back length of 121 cm to ensure an efficient protection of the operator down to the knees.



NFPA 70E



IEC 61482-2:2018

APC 1 / ATPV 12 cal/cm²

ISO 11612:2015 A B1 C1 E2 F1



EN 1149-5:2018



ASTM F1959



Nota. Tomado de(Cautuelec, 2021)

Guantes Dieléctricos de clase 2, para tensiones de 17 kV ac como mínimo que se debería usar en las subestaciones eléctrica.

Figura 35

Guantes dieléctricos

GUANTES COMPOSITE FLASH&GRIP CON PROTECCIÓN CONTRA EL ARCO ELÉCTRICO
EN 60903 E IEC 60903

Ventajas

- Guante 3 en 1 que combina resistencia dieléctrica, mecánica y térmica (ARCO ELÉCTRICO)
- Revestimiento exterior especialmente formulado que garantiza un “agarre” excepcional, incluso en condiciones húmedas o grasas.

USO
Guantes aislantes de material compuesto para trabajar con toda seguridad sin sobre guantes de cuero. Operación de mantenimiento específica con protección contra los efectos térmicos vinculados al arco eléctrico.

CARACTERÍSTICAS
Guantes de caucho natural con formulación especial para capa exterior en elastómero rojo anaranjado alto resultado, capa interior negra, bordes cortados, 41 cm de largo. Tallas 6 a 12. Propiedades especiales (categoría) RC, con protección mecánica. Arco eléctrico evaluado por un organismo notificado: box test y ATPV. IEC 61482-1-2

Significado de las marcas

AFG41-4-10

Guantes composite Arc flash
Longitud 41 cm
Talla 10
Clase 4



Referencia	Clase	Tensión máxima de utilización	Longitud (cm)	Tallas disponibles	Catégorie	CEI 61482-1-2	ARC 4 > 40 (cal/cm²) ASTM F2675
AFG41-00*	00	500 V AC	41 cm	7 - 12	RC	Clase 2 (0.5s - 7kA)	26,3 cal/cm²
AFG41-0*	0	1 000 V AC	41 cm	6 - 12	RC		71,6 cal/cm²
AFG41-1*	1	7 500 v AC	41 cm	7 - 12	RC		42,2 cal/cm²
AFG41-2*	2	17 000 V AC	41 cm	7 - 12	RC		74,5 cal/cm²
AFG41-3*	3	26 500 V AC	41 cm	8 - 12	RC		73,2 cal/cm²
AFG41-4*	4	36 000 V AC	41 cm	8 - 12	RC		87,7 cal/cm²

Nota. Tomado de(Pentaesp, 2024)

Casco y careta como protecciones mínimas y obligatorias que se debería usar para energía incidente de 12 cal/cm² ATPV (Valor de Protección Térmica contra Arco Eléctrico).

Figura 36

Casco y careta anti arco

ARC FLASH FACE SHIELD KIT
APC 2 - ATPV 12 cal/cm²

Composition	Reference: KIT-ARC-01	kg
		Weight
		1.5
MO-187	1 Face shield with chincup APC 2 and 12 cal/cm ² , absorbs > 99.9% of harmful UV radiation, 60% light transmission, tested to ASTM F 2178 specifications	
MO-182/1-B	1 ABS white helmet electrical insulation EN397, EN 50365, ANSI Z89.1 20 kV	
M-87384	1 carrying bag for face shield and helmet	

BENEFITS

- Electrician ABS helmet.
- Large field of view.
- Anti-UV and polycarbonate 1.5 mm thickness.
- Chin protection.

EN 166 / EN 170 / EN 397
EN 50365
IEC 61482-1-2 / GS-ET-29 / ANSI Z 89.1
ASTM F 2178 / IEC 61482-1-1
NFPA 70E
CE
⚡



Nota. Tomado de(Cautuelec, 2021)

Zapatos y botas dieléctricos: Los zapatos dieléctricos son obligatoria para el nivel 3 de energía incidente y también se puede usar botas dieléctricas para mayor seguridad

Figura 38

Botas dieléctricas



/ TBOBB

BOTAS DIELECTRICAS CLASE 3
EN ISO 20345 - SB E SRC / EN 50321-1 (CLASE 3) / ASTM 2412-18A (PROTECCIÓN DE TENSIÓN DE PASO HASTA 35KV) ASTM F2621-2019 (HASTA 40CAL/CM²) / ASTM F1117 - MARCADO CE EN EL VÁSTAGO CON INDICACIÓN DE LA FECHA Y EL AÑO DE FABRICACIÓN CUMPLE CON REACH

Ventajas

- Bota sin costuras con aislamiento eléctrico superior,
- Diseño ligero para mejorar la comodidad del usuario,
- Flexibilidad excepcional a bajas temperaturas, hasta -40°C,
- Máximo agarre de la suela,
- Plantilla ergonómica y acolchada (extraíble y lavable a máquina) para mayor comodidad del usuario,- Altura regulable

/ USO

Bota dieléctrica para aislamiento eléctrico para uso en entornos de alta tensión de hasta 26,5kV. Cada bota es probada a 30kV AC (corriente de fuga <20mA durante un ciclo de prueba de tres minutos). Protección ARC-FLASH a 40 Cal/cm².

/ CARACTERÍSTICAS

- Moldeo por inyección,
- Estructura ecológica sin PVC ni halógenos,
- Biodegradable y sin ftalatos,
- Suela moldeada antideslizante,
- Suela perfilada,
- Aislamiento del frío,
- Talón con sistema de soporte de túnel amortiguador,
- Puntera de acero con recubrimiento epoxi con un índice de fuerza de 200 julios,
- Forro de punto de nylon sin efecto de mecha,
- Pestaña de extracción,
- Lavable a máquina hasta 40°C.

Referencia	Descripción	Color	Clase dielectrica	Tensión Max. De utilización
TBOBB	Botas dieléctricas	Amarillo	Clase 2	17,5 kV
TBOBB-HV-		Verde fluor	Clase 3	26,5 kV

Nota. Tomado de(Pentaesp, 2024)

Pasamontañas es adecuado usar para el nivel de energía de 12cal/cm^2 este equipo de protección personal debe tener indicado los niveles de energía incidente para ser usados.

Figura 39

Pasamontañas anti arco



/ ARCCAG10

PASAMONTAÑAS ARC-FLASH – ATPV 12,1 CAL/CM²
 EN ISO 11612 (A1 Y A2 B1 C1 F1) / IEC 61482- 2 / EN 61482-1-2 (CLASE 1 DE ACUERDO CON BOX TEST), ASTM F1959-05 (12,1 CAL/CM², HAF 81,6% EN RELACIÓN AL MÉTODO ARCO ABIERTO).

Ventajas

- Muy cómodo, con costuras planas, y ergonómico.
- Permite utilizarlo con gafas con cristales correctores.

/ USO

Protección del cuello y del rostro frente al riesgo térmico de manera general, y contra el riesgo de quemaduras frente al arc-flash. A utilizar además del casco E-Shark (Ref: TC42ESBB), o además de un casco con pantalla de un nivel inferior o igual a 12cal/cm^2 , o de clase 2 inferior o igual. No propaga el fuego cuando el pasamontañas entra accidentalmente en contacto con el fuego.

/ CARACTERÍSTICAS

Tejidos de una sola capa: composición 88% algodón y 22% nylon
 Hilo de aramida con costuras planas,
 Color: azul marino
 Talla única
 Se envía en una bolsa individual con el manual de instrucciones

Referencia	Descripción	Talla
ARCCAG10	Pasamontañas Arc-Flash 12,1 cal/cm ²	Talla única

Nota. Tomado de(Pentaesp, 2024)

Dependiendo de los proveedores de equipo de protección personal se pueden tener en Kits donde incluya todo los EPP par una determinada categoría de energía incidente, para este caso se tiene desde 25 hasta 100cal/cm^2 y con elegir del mínimo valor para hacer uso en la subestación eléctrica de la unidad minera Yumpag es suficiente.

Figura 40*Kits de vestimenta anti arco*

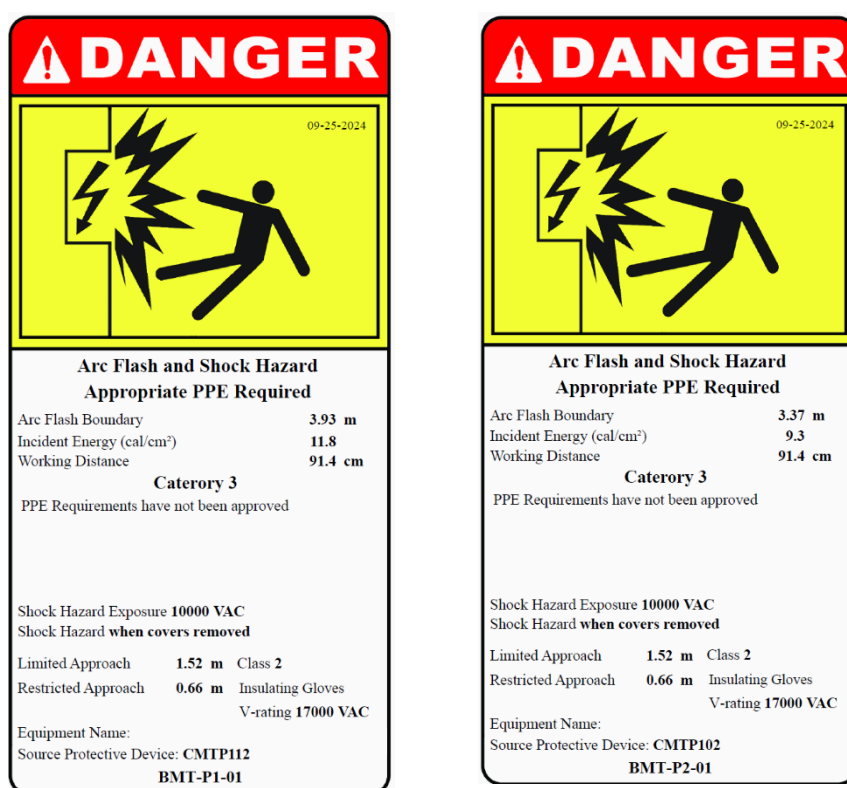
Composition of KITS	
-	1 protective set (jacket and bib overall) 25, 40, 65 or 100 cal/cm ² and tested according to the ASTM F 1506 and NFPA 70E specifications.
MO-11000	1 safety glasses EN 166/EN 170.
M-87295	1 carrying bag for the complete kit.
-	1 protective hood with integrated screen (12, 40, 65 ou 100 cal/cm ²), and tested according to the ASTM F 1506 and NFPA 70E specifications.
MO-182/1-B	1 electrician helmet EN 397, EN 50365, ANSI Z89.1 - 20 kV.
Gloves not included into the kits.	

Nota. Tomado de(Cautuelec, 2021)**Figura 41***Vestimenta completa para categoría 4**Nota.* Tomado de(Cautuelec, 2021)

Etiqueta de arco eléctrico: en esta es una señalización que nos va informar que tipo de EPP se va hacer uso antes de ingresar a las instalaciones la subestación eléctrica de la unidad minera Yumpag. Aquí se encontrará información de la energía incidente, distancia de trabajo, límite de seguridad, categoría de energía incidente y equipos de protección personal como mínimo a usar.

Figura 42

Etiqueta de arco eléctrico de las subestaciones en 10.0 kV



Nota. Elaboración propia

6 CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de arco eléctrico de la subestación eléctrica principal al pie de la chimenea 249 de la unidad minera Yumpag se observa que hay varias implicaciones importantes desde el punto de vista de seguridad como la operación de la subestación eléctrica. El análisis que se realizó fue mediante el software ETAP el cual permitió realizar los cálculos previos antes de llegar al análisis del arco eléctrico como el flujo de potencia, cortocircuitos y después de ello se tiene el cálculo del arco eléctrico como la energía incidente, distancia de seguridad, categorías de energía incidente y con este se puede realizar la selección de los equipos de protección personal.

La energía incidente para la subestación eléctrica según categoría varía desde 1, 2 y 3, lo cual es importante para tener en cuenta cuando se selecciona los equipos de protección personal. Como en las dos subestaciones eléctricas se tiene dos niveles de tensión en media tensión los cuales 10.0 kV y 4.16 kV, en el nivel de tensión de 10.0 kV se encuentran los niveles de energía incidente mayores por ende las categorías son mayores donde se va requerir que los equipos y protección personal sean más rigurosos. Para la subestación eléctrica principal con código SE-P-IM-01, en la barra de 10.0 kV con código BMT-P1-01 se tiene una energía incidente de 11.84 cal/cm² el cual se tendría una categoría de 3. Y para la subestación eléctrica principal con código SE-P-IM-02, en la barra de 10.0 kV con código BMT-P2-01 se tiene una energía incidente de 9.29 cal/cm² el cual se tendría una categoría de 3. En la barra de 4.16 kV de las dos subestaciones están en la categoría 2 por lo que su nivel de energía incidente es menor. Esto implica que en las barras de 10.0 kV se tendrá un riesgo mayor cuando se tenga accidentes por arco eléctrico como quemaduras graves.

En las dos subestaciones se tienen los dos niveles de tensión, quiere decir que los equipos como celdas de media tensión están en el mismo ambiente y cuando se requiera hacer la intervención a las subestaciones tendría que tener los equipos de protección personal para la energía incidente más crítica que la categoría 3, estos equipos de protección personal tendrán

7 CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos validan las hipótesis planteadas en la investigación.
- La energía incidente en la subestación SE-P-IM-01 es de 11.84 cal/cm².
- La energía incidente en la subestación SE-P-IM-02 es de 9.29 cal/cm².
- La categoría de energía incidente para ambas subestaciones es 1, 2 y 3, siendo la más crítica la categoría 3.
- Las barras de mayor tensión (10.0 kV) presentan mayor energía incidente que las de 4.16 kV.
- La distancia de seguridad en celdas de media tensión es de 91.4 cm.
- La frontera de arco eléctrico es de 3.93 m, lo que reduce exposición a riesgos térmicos.
- Los EPP deben soportar 25 cal/cm² y proteger el cuerpo entero.
- La corriente de arco eléctrico más alta es 7.71 kA en la barra BMT-P1-01 (10.0 kV) de SE-P-IM-01.
- Las etiquetas de seguridad se colocarán en el ingreso principal, asociadas a la categoría 3.
- La corriente de arco eléctrico en la barra BMT-P2-01 (10.0 kV) de SE-P-IM-02 es 7.69 kA, también crítica.
- Se utilizó la metodología IEEE 1584-2018 para cálculos y NFPA 70E-2018 para selección de EPP.

7.2 Recomendaciones

- Documentar y archivar los cálculos y resultados para futuras auditorías y actualizaciones.
- Implementar EPP que soporten al menos 25 cal/cm^2 , considerando el escenario más crítico.
- Garantizar que el personal en SE-P-IM-02 utilice EPP de categoría 3.
- Establecer protocolos operativos que consideren siempre la categoría más alta (3) como referencia.
- Priorizar inspecciones y mantenimiento preventivo en las barras de 10.0 kV.
- Señalizar físicamente las distancias de seguridad y capacitar al personal sobre su importancia.
- Delimitar la frontera de arco eléctrico con barreras físicas y señalización visible.
- Verificar periódicamente la certificación y estado de los EPP, reemplazando los que no cumplan la norma NFPA 70E.
- Ajustar y revisar la coordinación de protecciones en la barra BMT-P1-01 para minimizar la duración del arco.
- Asegurar que las etiquetas sean legibles, resistentes y actualizadas conforme a cambios en el sistema eléctrico.
- Incluir la barra BMT-P2-01 en los planes de mantenimiento y simulaciones de contingencia por arco eléctrico.
- Mantener actualizadas las normas IEEE 1584 y NFPA 70E, recalculando parámetros ante cambios en carga o configuración.

8 CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS

- Aguilar Pizarro, K. (2020). *Estudio de arco eléctrico en redes eléctricas industriales*. Obtenido de <https://repositorio.uta.cl/jspui/bitstream/20.500.14396/789/1/79241-Aguilar%20Katherine.pdf>
- Alarcón Mogollón, D. J. (2020). *Simulación de falla por arco eléctrico para evitar accidentes mortales en centrales térmicas*. Obtenido de https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/21842/1/alarcon_md.pdf
- Benita, M. (13 de mayo de 2020). *En un instante: tome medidas para proteger a los trabajadores de los peligros*. Obtenido de <https://www.ishn.com/articles/112500-in-a-flash-take-steps-to-protect-workers-from-hazards>
- Brady. (2024). *Que es el arco eléctrico*. Obtenido de <https://www.bradyid.com/resources/what-is-arc-flash>
- Cabello García, J. (2020). *Estudio del Arco Eléctrico (Arc Flash) en centrales nucleares en España*. España.
- Cabello García, J. R. (26 de enero de 2023). *Prevención frente al fenómeno del arco eléctrico (Arc flash) en el mantenimiento industrial*. Obtenido de <https://revista.aem.es/noticia/prevencion-frente-al-fenomeno-del-arco-electrico-arc-flash-en-el-mantenimiento-industrial>
- Cautuelec. (2021). *Equipo de protección personal*. Obtenido de www.catuelec.com
- Cristian Nateros, R. (2023). *Estudio del arco eléctrico para la elección de los equipos de protección del operador de la subestación Pisco*. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9877/T010_43787241_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Escobar Mena, D. A., & Hernández Nieto, J. A. (2020). *Análisis de estudio de sarco eléctrico mediante una aplicacion web basado en estandares IEEE1584-2018*. Salvador.
- ETAP. (2023). *Análisis de arco eléctrico*. Obtenido de <https://etap.com/product/arc-flash-software>
- FiraGran. (2018). *Niveles de ruido superiores a la tolerancia*. Obtenido de <https://firagran.com/es/niveles-de-ruido-superiores-a-la-tolerancia/#>
- G. Fast, D. S. (2016). iber to the Node (FTTN) Deployment: Challenges and Solutions. *ournal of Lightwave Technology*.
- Guevara G, C., Torres R, N., & Valero H, A. (2019). *Estudio de Arco Eléctrico en Pozos Petroleros Aplicando Normas IEEE STD.1584 y NFPA 70E*. Obtenido de <https://ojs.urbe.edu/index.php/revecitec/article/view/3626/4945>
- Hallé, R. (2020). *Arc flash electrical safety handbook*. Budapest.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodologías de la Investigación*. McGRAW-HILL.
- Huaynate Sanchez, A. J., & Nova Diaz, A. A. (2020). *Estudio de arco eléctrico en los centros de control de motores de una planta concentradora de 140000 tn/día ubicado A 4200 m s.n.m. para la implementación de medidas de seguridad del personal y equipos*. Arequipa.
- IEC-60479. (2007). *Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano*.
- IEEE-std-1584. (2018). *Guide for performing Arc-Flash Hazard Calculations*.
- Lobos, J. J. (2024). *Quemaduras*. Obtenido de <https://sintesis.med.uchile.cl/condiciones-clinicas/cirugia/cirugia-situaciones-clinicas-de-urgencia/11082-quemaduras-2>
- Moracho, I. (Marzo de 2021). *Arc Flash: el riesgo invisible*. Obtenido de <https://blogespanol.se.com/servicios/2021/03/29/arc-flash-el-riesgo-invisible/>

- Moreno Torres, T., Manuel Luna, J., García González, J., Luviano rtiz, L., & Hernandez uerrero, A. (2019). *Simulación de proceso de división de arco eléctrico en interruptor de bajo voltaje con campo magnético variable*. México.
- Neyra Vela, F. J. (2020). *Análisis de riesgos eléctricos en el sector minero – Cusco 2019*.
- NFPA-70E. (2018). *Norma para la seguridad electrica en lugares de trabajo*.
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Videla, J., & Romero Delgado, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. México.
- Pentaesp. (2024). *Equipo de protección individual*. Obtenido de www.pentaesp.com
- RESESATE-MEM/DM. (2013). *Reglamento de seguridad y Salud en el Trabajo con Electricidad*.
- Salgado Díaz, F. (2019). *Estudio Y Propuesta De Mitigación De Riesgo Por Arco Eléctrico En Planta Celulosa Nueva Aldea*. Chile.
- Segurinsa. (2013). *Trajes y accesorios de portección contr arco eléctrico*. Obtenido de www.segurinsa.com
- Siu Yupanqui, A. T. (2018). *DEeterminacion y evaluacion del arco electrico(Arc Flash) para la implementacion de precedimientos y seguridad del personal que labora en el area electrica de una planta concentradora de cobre*. Arequipa.
- Tecsa. (2020). *Diferencia entre arc flash y arc blast*. Obtenido de <https://www.tecsagro.com.mx/blog/diferencia-entre-arc-flash-y-arc-blast/>
- Vásquez Valdés, I. A. (2023). *Estudio de Arc Flash para categorizar zonas de riesgo en la planta de Masisa Mapal*.

9 ANEXOS

Anexo 1: Resumen de energía del incidente en las barras

Anexo 2: Resumen del análisis de arco eléctrico en las barras

Anexo 3: Hoja de datos del estudio de arco eléctrico en SE-P-IM-01

Anexo 4: Hoja de datos del estudio de arco eléctrico en SE-P-IM-02

Anexo 5: Matriz de consistencia

Anexo 6: Reporte del estudio de arco eléctrico

Anexo 1:
Resumen de energía del incidente en las
barras

Project:

Location:

Contract:

Engineer:

Filename:

Ing. detalle SE.IM Yumpag

P_001_23

ETAP

21.0.1C

Study Case: T_AF_3F

Page:

Date:

SN:

Revision:

Config.:

1

10-16-2024

0809449000

Base

Normal

Estudios eléctricos

Bus Incident Energy Summary

Bus			Total Fault Current (kA)		Arc-Flash Analysis Results			
ID	Nom. kV	Type	Bolted	Arcing	FCT (cycles)	Incident E (cal/cm²)	AFB (m)	Energy Level
BMT-P1-01	10.000	Switchgear	8.480	7.713	75.210	11.843	3.93	Caterory 3
BMT-P1-02	4.160	Switchgear	7.752	6.790	46.123	6.238	2.61	Caterory 2
BMT-P1-03	4.160	Switchgear	7.719	6.762	46.108	6.211	2.61	Caterory 2
BMT-P1-04	4.160	Switchgear	10.171	8.868	10.800	1.895	1.22	Caterory 1
BMT-P1-05	4.160	Switchgear	10.171	8.868				
BMT-P2-01	10.000	Switchgear	8.571	7.698	59.114	9.288	3.37	Caterory 3
BMT-P2-02	4.160	Switchgear	5.383	4.738	46.044	4.384	2.09	Caterory 2
BMT-P2-03	4.160	Switchgear	4.969	4.378	46.006	4.056	1.99	Caterory 2

Anexo 2:
**Resumen del análisis de arco eléctrico en
las barras**

Project:

Location:

Contract:

Engineer:

Filename:

Ing. detalle SE.IM Yumpag

P_001_23

ETAP

21.0.1C

Study Case: T_AF_3F

Page:

Date:

SN:

Revision:

Config.:

1

10-16-2024

0809449000

Base

Normal

Estudios eléctricos

Bus Arc Flash Hazard Analysis Summary

Faulted Bus				Fault Current			Trip Device				Arc Flash	Incident	Working	Energy
ID	Nom. kV	Equipment Type	Gap (mm)	Bolted Fault (kA) Bus	PD PD	PD Arc Fault (kA)	Source Trip Device ID	Trip (cycle)	Open (cycle)	FCT (cycle)	Boundary (m)	Energy (cal/cm²)	Distance (cm)	Level
BMT-P1-01	10.000	Switchgear	152	8.480	1.787	1.626	CMTP112	70.41	4.80	75.21	3.9	11.8	91	Caterory 3
BMT-P1-02	4.160	Switchgear	104	7.752	4.187	3.667	CMTP110	41.32	4.80	46.12	2.6	6.2	91	Caterory 2
BMT-P1-03	4.160	Switchgear	104	7.719	4.189	3.670	CMTP111	41.31	4.80	46.11	2.6	6.2	91	Caterory 2
BMT-P1-04	4.160	Switchgear	104	10.171	1.298	1.132	CMTP101	6.00	4.80	10.80	1.2	1.9	91	Caterory 1
BMT-P1-05	4.160	Switchgear	104	10.171							0.0	0.0	91	
BMT-P2-01	10.000	Switchgear	152	8.571	0.790	0.709	CMTP102	54.31	4.80	59.11	3.4	9.3	91	Caterory 3
BMT-P2-02	4.160	Switchgear	104	5.383	4.182	3.681	CMTP207	41.24	4.80	46.04	2.1	4.4	91	Caterory 2
BMT-P2-03	4.160	Switchgear	104	4.969	4.186	3.687	CMTP208	41.21	4.80	46.01	2.0	4.1	91	Caterory 2

Anexo 3:
Hoja de datos del estudio de arco eléctrico
en SE-P-IM-01

Arc Flash Study Data Sheet

Project / System Data

Project Title	Análisis de arco eléctrico	Project Standard	ANSI	Date	10-16-2024
Location	Unidad Minera Yumpag	System Frequency	60.00 Hz	ETAP Version	21.0.1C
Contract #		Unit System	Metric	Configuration	Normal
Engineer		Caloric Unit	cal/cm²	Study Case ID	T_AF_3F
Project Location					
Output Report Location					
Report Name					
Library File					

Arc Flash Summary Results for This Location: BMT-P1-01

Arc Flash Risk Assessment		Shock Risk Assessment			
Shock Hazard Voltage	10.000 kV	Restricted Approach Boundary	65.84 cm	V-Rated Gloves	Yes
Incident Energy	11.8 cal/cm²	Limited Approach Boundary	1 m 52.4 cm	V-Rated Glove Class	2
Fault Clearing Time	75.210 cycles			Glove V-Rating	17000 VAC
Source Protective Device:	CMTPI12				
Arc Flash Boundary	3.93 m				
Work Distance	91 cm				
Caterory 3					
PPE	PPE Requirements have not been approved				

Arc Flash Input Data

Working Distance	Typical IEEE 1584-2018	EB for Arc Flash Boundary	1.2 cal/cm²
Gap	Typical IEEE 1584-2018	Incident Energy Levels from	NFPA 70E 2012 to NFPA 2021/User Defined
Shock Protection Boundaries	NFPA 70E 2018 to 2021		
Voltage-Rated Gloves:	00 500 VAC	0 1000 VAC	Caterory 0.0 - 4.0 cal/cm²
ASTM D120-14a	1 7500 VAC	2 17000 VAC	Caterory 4.0 - 8.0 cal/cm²
	3 26500 VAC	4 36000 VAC	Caterory 8.0 - 25.0 cal/cm²
			Caterory 25.0 - 40.0 cal/cm²
			Level E 40.0 - 0.0 cal/cm²
			Level F 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Level G 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Level H 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Level I 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Level J 0.0 - 0.0 cal/cm²

System Impedance Adjustments

Apply Positive or Negative Adjustments: Positive

- ☐ Consider Equip. Cable & OL Heater Impedance for MV Motors
☐ Consider Equip. Cable & OL Heater Impedance for LV Motors

Impedance Tolerance

- ☒ Transformer Individual
☒ Reactor Individual
☐ Overload Heater

Resistance Temperature Correction

- ☐ Cable
☐ Line

Length Tolerance

- ☒ Cable Individual
☒ Line Individual

Short-Circuit Contributions

Bus Bolted Fault Current

- ☒ Symmetrical ½ Cycle
☐ Symmetrical 1.5 to 4 Cycle
☐ Fault Current Decay

Motor Contribution Based on

- ☒ Motor Status
☐ Loading Category
☐ Both

Prefault Voltage

- ☒ Nominal kV x 100%
☐ Base kV x 100%
☐ Vmag from Load Flow

Arc Flash Methodology

Method

- ☐ IEEE 1584 2002 & 2004a ☐ Include Capacitor Stored Energy
☒ IEEE 1584 2018

Source PD Selection for Arc Fault Clearing Time

- ☒ Automatically Select Source Protective Device (PD)

Protective Device Incident Energy

- ☒ Total Bus Fault Current

- ☐ User-Defined Fault Clearing Time

Automatically determine the Incident Energy at:

- ☒ Bus
☒ Source Protective Device (Main line-side fault)
☒ Load Protective Device
☐ Load (Motor) Terminal

Anexo 4:
Hoja de datos del estudio de arco eléctrico
en SE-P-IM-02

Arc Flash Study Data Sheet

Project / System Data

Project Title	Análisis de arco eléctrico	Project Standard	ANSI	Date	10-16-2024
Location	Unidad Minera Yumpag	System Frequency	60.00 Hz	ETAP Version	21.0.1C
Contract #		Unit System	Metric	Configuration	Normal
Engineer		Caloric Unit	cal/cm²	Study Case ID	T_AF_3F

Project Location
Output Report Location
Report Name
Library File

Arc Flash Summary Results for This Location: BMT-P2-01

Arc Flash Risk Assessment		Shock Risk Assessment	
Shock Hazard Voltage	10.000 kV	Restricted Approach Boundary	65.84 cm
Incident Energy	9.3 cal/cm²	V-Rated Gloves	Yes
Fault Clearing Time	59.114 cycles	Limited Approach Boundary	1 m 52.4 cm
Source Protective Device:	CMTP102	V-Rated Glove Class	2
Arc Flash Boundary	3.37 m	Glove V-Rating	17000 VAC
Work Distance	91 cm		
Caterory 3			
PPE	PPE Requirements have not been approved		

Arc Flash Input Data

Working Distance	Typical IEEE 1584-2018	EB for Arc Flash Boundary	1.2 cal/cm²
Gap	Typical IEEE 1584-2018	Incident Energy Levels from	NFPA 70E 2012 to NFPA 2021/User Defined
Shock Protection Boundaries	NFPA 70E 2018 to 2021		
Voltage-Rated Gloves:	00 500 VAC	0 1000 VAC	Caterory 0.0 - 4.0 cal/cm²
ASTM D120-14a	1 7500 VAC	2 17000 VAC	Caterory 4.0 - 8.0 cal/cm²
	3 26500 VAC	4 36000 VAC	Caterory 8.0 - 25.0 cal/cm²
			Caterory 25.0 - 40.0 cal/cm²
			Caterory 40.0 - 0.0 cal/cm²
			Caterory 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Caterory 0.0 - 0.0 cal/cm²
			Caterory 0.0 - 0.0 cal/cm²

System Impedance Adjustments

Apply Positive or Negative Adjustments: Positive

- ☐ Consider Equip. Cable & OL Heater Impedance for MV Motors
☐ Consider Equip. Cable & OL Heater Impedance for LV Motors

Impedance Tolerance

- ☒ Transformer Individual
☒ Reactor Individual
☐ Overload Heater

Resistance Temperature Correction

- ☐ Cable
☐ Line

Length Tolerance

- ☒ Cable Individual
☒ Line Individual

Short-Circuit Contributions

Bus Bolted Fault Current

- ☒ Symmetrical 1/2 Cycle
☐ Symmetrical 1.5 to 4 Cycle
☐ Fault Current Decay

Motor Contribution Based on

- ☒ Motor Status
☐ Loading Category
☐ Both

Prefault Voltage

- ☒ Nominal kV x 100%
☐ Base kV x 100%
☐ Vmag from Load Flow

Arc Flash Methodology

Method

- ☐ IEEE 1584 2002 & 2004a ☐ Include Capacitor Stored Energy
☒ IEEE 1584 2018

Source PD Selection for Arc Fault Clearing Time

- ☒ Automatically Select Source Protective Device (PD)

Protective Device Incident Energy

- ☒ Total Bus Fault Current

- ☐ User-Defined Fault Clearing Time

Automatically determine the Incident Energy at:

- ☒ Bus
☒ Source Protective Device (Main line-side fault)
☒ Load Protective Device
☐ Load (Motor) Terminal

Anexo 5:
Matriz de consistencia

Título del estudio: Análisis de Arc Flash en la subestación eléctrica del pie de la chimenea 249 de la UM Yumpag mediante la aplicación del software ETAP						
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables			Metodología
	Objetivo General	Hipótesis General	Tipo	Dimensiones	Indicadores	
Problema General	Evaluar el impacto del riesgo asociado al arco eléctrico mediante simulaciones en ETAP y normativa NFPA 70E	El análisis del riesgo asociado al arco eléctrico mediante ETAP reducirá la exposición del personal operativo a lesiones térmicas en un 70%, al establecer fronteras de protección y EPP alineados con NFPA 70E	Independiente: Riesgo asociado al arco eléctrico	Energía incidente	Energía incidente (cal/cm ²)	Tipo: Aplicada Diseño: No experimental, transversal, descriptivo Técnica: Simulación ETAP + revisión documental
Problema Específico	Objetivo Específico	Hipótesis Específica		Distancia de seguridad	Distancia de trabajo (cm)	
¿Cuál es la energía incidente para mitigar el riesgo asociado al Arc Flash?	Calcular la energía incidente en las barras de 10 kV y 4.16 kV	Mayores niveles de energía incidente exigen EPP de mayor categoría, reduciendo quemaduras		Frontera de arco eléctrico	AFB (m)	
¿Cuál es la distancia de seguridad para mitigar el riesgo?	Determinar la distancia de seguridad	Determinación de la distancia de seguridad disminuye la probabilidad de exposición		Equipos de protección	Tipo de EPP	
¿Cuál es la frontera de protección?	Establecer la frontera de protección	Implementación de fronteras de protección basadas en simulaciones ETAP reducirá el acceso no autorizado a áreas con riesgo de arco eléctrico	Dependiente: Seguridad del personal operativo	Implementación de medidas de seguridad	Etiquetas de seguridad	
¿Qué características deben tener los EPP?	Seleccionar EPP adecuado	Selección de EPP según la energía incidente calculada mejorara el cumplimiento de protocolos de seguridad del personal				

Anexo 6:
Reporte del estudio de arco eléctrico

Estudios eléctricos

Electrical Transient Analyzer Program

Arc Flash Analysis

IEEE 1584-2018

ANSI Short-Circuit

	Swing	V-Control	Load	Total			
Number of Buses:	3	0	27	30			
	XFMR2	XFMR3	Reactor	Line/Cable	Impedance	Tie PD	Total
Number of Branches:	20	0	0	14	0	2	36
	Synchronous Generator	Power Grid	Synchronous Motor	Induction Machines	Lumped Load	Inverter	Total
Number of Machines:	4	2	0	5	9	0	20
System Frequency:	60.00						
Unit System:	Metric						
Project Filename:	P_001_23						
Output Filename:	G:\Otros ordenadores\Mi portátil\MARCOS_DRIVE\2-MIS PROYECTOS(ETAP)\Tesis2024\P_001_23\T_AF_3F.AAFS						

Adjustments

Tolerance	Apply Adjustments	Individual /Global	Percent
Transformer Impedance:	Yes	Individual	
Reactor Impedance:	Yes	Individual	
Overload Heater Resistance:	No		
Transmission Line Length:	No		
Cable / Busway Length:	No		

Temperature Correction	Apply Adjustments	Individual /Global	Degree C
Transmission Line Resistance:	Yes	Individual	
Cable / Busway Resistance:	Yes	Individual	

Energy Levels

NFPA 70E 2024 / Z462 2024 / User-Defined

Level ID	cal/cm²
Categoria 1	4.00
Categoria 2	8.00
Categoria 3	25.00
Categoria 4	40.00
Level E	0.00
Level F	0.00
Level G	0.00
Level H	0.00
Level I	0.00
Level J	0.00

Bus Input Data

Bus					Initial Voltage	
ID	Type	Nom. kV	Base kV	Sub-sys	%Mag.	Ang.
B-GE-1	Load	4.160	4.160	2	100.00	0.00
B-GE-2	SWNG	0.440	0.440	2	100.00	0.00
B-GE-4	Load	10.000	10.000	1	100.00	0.00
B-GE-5	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-IM1-1	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-IM1-2	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
B-IM4-1	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-IM4-2	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
B-IM6-1	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-IM6-2	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
B-IM7-5	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
B-IM7-6	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-IM7-7	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
B-IM7-8	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-RS-1	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
B-RS-2	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
BMT-P1-1	Load	10.000	10.000	1	100.00	0.00
BMT-P1-02	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P1-03	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P1-04	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P1-05	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P2-01	Load	10.000	10.000	1	100.00	0.00
BMT-P2-02	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P2-03	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT-P3-01	Load	4.160	4.160	1	100.00	0.00
BMT_OTROS	SWNG	10.000	10.000	1	100.00	0.00
PLATAFORMA 3	SWNG	10.000	10.000	1	100.00	0.00
BMT_OTROS-249						
Bus5	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00
Bus7	Load	0.220	0.220	1	100.00	0.00
Bus9	Load	0.440	0.440	1	100.00	0.00

30 Buses Total

All voltages reported by ETAP are in % of bus Nominal kV.
Base kV values of buses are calculated and used internally by ETAP.

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 4
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Bus / Enclosure Input Data

Faulted Bus			Arc Flash Ratings								
Enclosure ID	ID	Nom. kV	Equipment Type	Electrode Configuration	Conductor		Enclosure Dimensions (mm)			Working Distance (cm)	Avail. Protection cal/cm²
					Type	Gap (mm)	Height	Width	Depth		
	BMT-P1-1	10.000	Other	VCB	Copper	152	660.00	660.00	660.00	91.44	
	BMT-P1-02	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	
	BMT-P1-03	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	
	BMT-P1-04	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	
	BMT-P1-05	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	
	BMT-P2-01	10.000	Other	VCB	Copper	152	660.00	660.00	660.00	91.44	
	BMT-P2-02	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	
	BMT-P2-03	4.160	Other	VCB	Copper	104	508.00	508.00	508.00	91.44	

The Gap is not utilized if the theoretically derived Lee method was used to determine the incident energy and arc flash boundary .
The Lee method is used if the bus voltage and/or short-circuit parameters are outside the range covered by the IEEE 1584 empirical equations.

Line/Cable/Busway Input Data

ohms or siemens/1000 m per Conductor (Cable) or per Phase (Line/Busway)									
Line/Cable/Busway		Length							
ID	Library	Size	Adj. (m)	% Tol.	#/Phase	T (°C)	R	X	Y
Cable2	6.0NCUS3	120	300.0	0	2	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable5	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable6	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable7	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable9	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable15	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable17	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
Cable19	6.0NCUS3	120	300.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
LMT-CH249-01	15NCUS3	120	320.0	0	1	75	0.18694	0.11900	0.0000000
LMT-CH249-02	15NCUS3	120	320.0	0	1	75	0.18694	0.11900	0.0000000
LMT-IM-01	6.0NCUS3	120	500.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
LMT-IM-02	6.0NCUS3	120	500.0	0	1	75	0.18789	0.09970	0.0000000
LMT.P1.P2-02	15NCUS3	120	100.0	0	1	75	0.18694	0.11900	0.0000000
LMTP2.P1-01	15NCUS3	120	100.0	0	1	75	0.18694	0.11900	0.0000000

Line / Cable / Busway resistances are listed at the specified temperatures.

2-Winding Transformer Input Data

Transformer		Rating				Z Variation			% Tap Setting		Adjusted
ID	MVA	Prim. kV	Sec. kV	% Z	X/R	+ 5%	- 5%	% Tol.	Prim.	Sec.	% Z
T1	2.500	0.440	4.160	5.75	10.67	0	0	0	0	0	5.7500
T3	1.000	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
T4	1.000	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
T5	2.500	0.440	4.160	5.75	10.67	0	0	0	0	0	5.7500
T7	1.000	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
T13	2.500	0.440	4.160	5.75	10.67	0	0	0	0	0	5.7500
T17	1.500	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
T18	2.500	10.000	4.160	5.75	10.67	0	0	0	0	0	5.7500
T19	1.000	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
T20	2.500	10.000	4.160	5.75	10.67	0	0	0	0	0	5.7500
T26	1.000	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P1-01	2.500	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P1-02	2.500	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P1-03	2.500	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P1-04	2.500	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P1-05	0.050	10.000	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P2-01	2.000	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P2-02	2.000	10.000	4.160	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P2-03	0.400	4.160	0.440	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000
TR-P2-04	0.050	4.160	0.220	5.50	7.10	0	0	0	0	0	5.5000

Estudios eléctricos

Branch Connections

CKT/Branch		Connected Bus ID		% Impedance, Pos. Seq., 100 MVAb			
ID	Type	From Bus	To Bus	R	X	Z	Y
T1	2W XFMR	B-GE-2	B-GE-1	21.46	229.00	230.00	
T3	2W XFMR	B-IM7-6	B-IM7-5	76.73	544.62	550.00	
T4	2W XFMR	B-IM1-1	B-IM1-2	76.73	544.62	550.00	
T5	2W XFMR	B-GE-2	B-GE-1	21.46	229.00	230.00	
T7	2W XFMR	B-IM7-8	B-IM7-7	76.73	544.62	550.00	
T13	2W XFMR	B-GE-2	B-GE-1	21.46	229.00	230.00	
T17	2W XFMR	B-IM6-1	B-IM6-2	51.15	363.08	366.67	
T18	2W XFMR	B-GE-4	B-GE-5	21.46	229.00	230.00	
T19	2W XFMR	B-IM4-1	B-IM4-2	76.73	544.62	550.00	
T20	2W XFMR	B-GE-4	B-GE-5	21.46	229.00	230.00	
T26	2W XFMR	B-RS-1	B-RS-2	76.73	544.62	550.00	
TR-P1-01	2W XFMR	BMT-P1-1	BMT-P1-02	30.69	217.85	220.00	
TR-P1-02	2W XFMR	BMT-P1-1	BMT-P1-03	30.69	217.85	220.00	
TR-P1-03	2W XFMR	BMT-P1-1	BMT-P1-04	30.69	217.85	220.00	
TR-P1-04	2W XFMR	BMT-P1-1	BMT-P1-05	30.69	217.85	220.00	
TR-P1-05	2W XFMR	BMT-P1-1	Bus9	1534.58	10892.43	11000.00	
TR-P2-01	2W XFMR	BMT-P2-01	BMT-P2-02	38.36	272.31	275.00	
TR-P2-02	2W XFMR	BMT-P2-01	BMT-P2-03	38.36	272.31	275.00	
TR-P2-03	2W XFMR	BMT-P2-02	Bus5	191.82	1361.55	1375.00	
TR-P2-04	2W XFMR	BMT-P2-03	Bus7	1534.58	10892.43	11000.00	
Cable2	Cable	B-GE-5	B-IM1-1	16.29	8.64	18.44	
Cable5	Cable	B-RS-1	B-GE-5	32.57	17.28	36.87	
Cable6	Cable	BMT-P1-02	B-IM7-6	32.57	17.28	36.87	
Cable7	Cable	BMT-P1-02	B-IM7-8	32.57	17.28	36.87	
Cable9	Cable	BMT-P1-03	B-IM7-8	32.57	17.28	36.87	
Cable15	Cable	B-IM1-1	BMT-P3-01	32.57	17.28	36.87	
Cable17	Cable	BMT-P3-01	B-IM6-1	32.57	17.28	36.87	
Cable19	Cable	BMT-P3-01	B-IM4-1	32.57	17.28	36.87	
LMT-CH249-01	Cable	BMT_OTROS-249	BMT-P2-01	5.98	3.81	7.09	
LMT-CH249-02	Cable	BMT_OTROS-249	BMT-P2-01	5.98	3.81	7.09	
LMT-IM-01	Cable	BMT-P1-04	BMT-P3-01	54.29	28.81	61.46	
LMT-IM-02	Cable	BMT-P1-05	BMT-P3-01	54.29	28.81	61.46	
LMT.P1.P2-02	Cable	BMT-P1-1	BMT-P2-01	1.87	1.19	2.22	
LMTP2.P1-01	Cable	BMT-P1-1	BMT-P2-01	1.87	1.19	2.22	
CB33	Tie Breaker	B-GE-4	BMT_OTROS PLATAFORMA 3				
CB34	Tie Breaker	B-GE-4	BMT_OTROS PLATAFORMA 3				

Page: 8

Date: 11-22-2025

SN: DNDLYIR

Revision: Base

Config.: Normal

Power Grid Input Data

Total Connected Power Grids (= 2): 190.666 MVA

								% Impedance in Machine Base			
								Xd''		Xd'	
Synchronous Generator		Connected Bus	Rating			X/R Ratio		R	Adj.	Tol.	Xd'
ID	Type	ID	MVA	kV	RPM	X''/R	X'/R				
Gen1	Steam Turbo	B-GE-2	2.353	0.440	1800	19.00	19.00	1.000	19.00	0.0	28.00
Gen3	Steam Turbo	B-GE-2	2.353	0.440	1800	19.00	19.00	1.000	19.00	0.0	28.00
Gen6	Steam Turbo	B-GE-2	2.353	0.440	1800	19.00	19.00	1.000	19.00	0.0	28.00
Gen7	Steam Turbo	B-GE-2	2.353	0.440	1800	19.00	19.00	1.000	19.00	0.0	28.00

Total Connected Synchronous Generators (= 4): 9.412 MVA

Page: 9

Date: 11-22-2025

SN: DNDLYIR

Revision: Base

Config.: Normal

Estudios eléctricos

Induction Machine Input Data

Induction Machine		Connected Bus	Rating				X/R Ratio		% Impedance Machine Base		
ID	Qty	ID	HP/kW	kVA	kV	RPM	X"/R	X'/R	R	X"	X'
<u>Motors</u>											
Mtr01	1	BMT-P2-02	600.00	520.29	4.160	1800	20.44	20.44	0.90	18.46	46.15
Mtr02	1	BMT-P2-02	600.00	520.29	4.160	1800	20.44	20.44	0.90	18.46	46.15
Mtr03	1	BMT-P2-02	600.00	520.29	4.160	1800	20.44	20.44	0.90	18.46	46.15
Mtr04	1	BMT-P2-03	600.00	520.29	4.160	1800	20.44	20.44	0.90	18.46	46.15
Mtr05	1	BMT-P2-03	600.00	520.29	4.160	1800	20.44	20.44	0.90	18.46	46.15

Total Connected Induction Motors (= 5): 2601.4 kVA

Lumped Load Input Data

Lumped Load						Motor Loads							Static Loads	
Lumped Load	Connected Bus	Rating		% Load		Loading		X/R Ratio		% Impedance (Machine Base)			Loading	
		kVA	kV	MTR	STAT	kW	kvar	X"/R	X'/R	R	X"	X'	kW	kvar
Lump2	B-IM7-5	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
Lump4	B-IM4-2	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
Lump5	B-IM7-7	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
Lump6	B-IM6-2	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
Lump12	B-IM1-2	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
Lump13	B-RS-2	536.8	0.440	40	60	204.0	67.1	2.38	2.38	10.049	23.92	9999.00	306.00	100.58
TSAP101	Bus9	40.0	0.440	80	20	24.5	15.2	2.38	2.38	7.757	18.46	46.15	6.12	3.79
TSAP201	Bus5	100.0	0.440	80	20	61.2	37.9	2.38	2.38	7.757	18.46	46.15	15.30	9.48
TSAP202	Bus7	40.0	0.220	80	20	24.5	15.2	2.38	2.38	7.757	18.46	46.15	6.12	3.79

Total Connected Lumped Loads (= 9): 3401.1 kVA

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 10
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Flash Analysis
½ Cycle Calculation Method

Arc Fault Location					Correction Factors				Incident Energy					
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
BMT-P1-1	BMT-P1-1		Bus Arc Fault	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30
CMTP101	BMT-P1-1		Source PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30
CMTP107	BMT-P1-1		Source PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30
CMTP108	BMT-P1-1		Source PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP113	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30
CMTP109	BMT-P1-1		Load PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30
CMTP102	BMT-P1-1		Source PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2	Total =	13.615	4.30

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 11
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location						Correction Factors				Incident Energy				
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
CMTP106	BMT-P1-1		Load PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2		Total =	
CMTP105	BMT-P1-1		Load PD Line Side	VCB	10.000	0	0.890	8.480	7.713	1.626	75.2	CMTP112	13.615	
										FCT =	75.2		Total =	
BMT-P1-02	BMT-P1-02		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	7.752	6.790	3.667	46.1	CMTP110	7.735	
										FCT =	46.1		Total =	
CMTP110	BMT-P1-02		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	7.752	6.790	1.525	66.7	CMTP105	11.188	
										FCT =	66.7		Total =	
CMTP116	BMT-P1-02		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	7.752	6.790	3.667	46.1	CMTP110	7.735	
										FCT =	46.1		Total =	
CMTP114	BMT-P1-02		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	7.752	6.790	3.667	46.1	CMTP110	7.735	
										FCT =	46.1		Total =	

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 12
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location						Correction Factors		Incident Energy						
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
BMT-P1-03	BMT-P1-03		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	7.719	6.762	3.670	46.1	CMTP111	7.701	
										FCT =	46.1	Total =	7.701	2.99
CMTP117	BMT-P1-03		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	7.719	6.762	3.670	46.1	CMTP111	7.701	
										FCT =	46.1	Total =	7.701	2.99
CMTP111	BMT-P1-03		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	7.719	6.762	1.527	66.7	CMTP106	11.137	
										FCT =	66.7	Total =	11.137	3.78
BMT-P1-04	BMT-P1-04		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	10.171	8.868	1.132	10.8	CMTP101	2.350	
										FCT =	10.8	Total =	2.350	1.40
CMTP112	BMT-P1-04		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	10.171	8.868	1.132	10.8	CMTP101	2.350	
										FCT =	10.8	Total =	2.350	1.40
CMTP118	BMT-P1-04		Source PD Line Side	VCB	4.160	0		10.171	0.000	0.000			0.000	
												Total =	0.000	0.00

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 13
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location				Correction Factors				Incident Energy						
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
BMT-P1-05	BMT-P1-05		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	10.171	8.868	0.000		Cannot be Determined	0.000	
												Total =	0.000	0.00
CMTP113	BMT-P1-05		Source PD Line Side	VCB	4.160	0		10.171	0.000	0.000		Cannot be Determined	0.000	
												Total =	0.000	0.00
CMTP119	BMT-P1-05		Source PD Line Side	VCB	4.160	0		10.171	0.000	0.000		Cannot be Determined	0.000	
												Total =	0.000	0.00
BMT-P2-01	BMT-P2-01		Bus Arc Fault	VCB	10.000	2	0.890	8.571	7.698	0.709	59.1	CMTP102	10.678	
										FCT =	59.1	Total =	10.678	3.68
CMTP201	BMT-P2-01		Source PD Line Side	VCB	10.000	0		8.571	0.000	0.000			0.000	
												Total =	0.000	0.00
CMTP203	BMT-P2-01		Load PD Line Side	VCB	10.000	2	0.890	8.571	7.698	0.709	59.1	CMTP102	10.678	
										FCT =	59.1	Total =	10.678	3.68
CMTP206	BMT-P2-01		Load PD Line Side	VCB	10.000	2	0.890	8.571	7.698	0.709	59.1	CMTP102	10.678	
										FCT =	59.1	Total =	10.678	3.68

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 14
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location					Correction Factors				Incident Energy					
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
CMTP202	BMT-P2-01		Source PD Line Side	VCB	10.000	0		8.571	0.000	0.000			0.000	
													Total = 0.000	
CMTP205	BMT-P2-01		Source PD Line Side	VCB	10.000	2	0.890	8.571	7.698	0.709	59.1	CMTP102	10.678	
										FCT = 59.1		Total = 10.678	3.68	
CMTP218	BMT-P2-01		Source PD Line Side	VCB	10.000	2	0.890	8.571	7.698	0.709	59.1	CMTP101	10.678	
										FCT = 59.1		Total = 10.678	3.68	
BMT-P2-02	BMT-P2-02		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	3.681	46.0	CMTP207	5.436	
										FCT = 46.0		Total = 5.436	2.39	
CMTP213	BMT-P2-02		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	3.681	46.0	CMTP207	5.436	
										FCT = 46.0		Total = 5.436	2.39	
CMTP207	BMT-P2-02		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	1.531	55.5	CMTP203	6.552	
										FCT = 55.5		Total = 6.552	2.70	
CMTP209	BMT-P2-02		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	3.681	46.0	CMTP207	5.436	
										FCT = 46.0		Total = 5.436	2.39	

Project: Ing. detalle SE.IM Yumpag
Location:
Contract:
Engineer:
Filename: P_001_23

ETAP
24.0.1N

Study Case: A_SC

Page: 15
Date: 11-22-2025
SN: DNDLYIR
Revision: Base
Config.: Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location						Correction Factors				Incident Energy				
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											
CMTP210	BMT-P2-02		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	3.681	46.0	CMTP207	5.436	2.39
										FCT =	46.0	Total =	5.436	
CMTP211	BMT-P2-02		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	5.383	4.738	3.681	46.0	CMTP207	5.436	2.39
										FCT =	46.0	Total =	5.436	
BMT-P2-03	BMT-P2-03		Bus Arc Fault	VCB	4.160	0	1.000	4.969	4.378	3.687	46.0	CMTP208	5.029	2.28
										FCT =	46.0	Total =	5.029	
CMTP217	BMT-P2-03		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	4.969	4.378	3.687	46.0	CMTP208	5.029	2.28
										FCT =	46.0	Total =	5.029	
CMTP208	BMT-P2-03		Source PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	4.969	4.378	1.534	55.4	CMTP206	6.060	2.57
										FCT =	55.4	Total =	6.060	
CMTP214	BMT-P2-03		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	4.969	4.378	3.687	46.0	CMTP208	5.029	2.28
										FCT =	46.0	Total =	5.029	
CMTP215	BMT-P2-03		Load PD Line Side	VCB	4.160	0	1.000	4.969	4.378	3.687	46.0	CMTP208	5.029	2.28
										FCT =	46.0	Total =	5.029	

Project:	Ing. detalle SE.IM Yumpag	ETAP	Page:	16
Location:		24.0.1N	Date:	11-22-2025
Contract:			SN:	DNDLYIR
Engineer:		Study Case: A_SC	Revision:	Base
Filename:	P_001_23		Config.:	Normal

Estudios eléctricos

Arc Fault Location						Correction		Incident Energy						
						Factors								
Element ID	Connected Bus ID	Enclosure		Electrode Config.	Prefault kV	Iarc Var. (%)	Encl. CF (pu)	Ibf" (kA)	Ia" (kA)	Source PD Ia" (kA)	FCT (Cycles)	Source PD ID	IE (cal/cm²)	AFB (m)
		ID	Type											

The FCT (fault clearing time) has been limited to the maximum value allowed in the study case. The incident energy is calculated using this value.

+ The theoretically derived Lee method was used to determine the incident energy and flash protection boundary for this location since the bolted fault current or nominal voltage or gap values are outside the empirical IEEE 1584-2018 method range.

0 The incident energy has been automatically assigned at this location (i.e. 2000 A/ 240 Volt limit guideline) based on actual study case settings.

1 The user-defined fault clearing PD, as specified in the bus/enclosure editor, is outside the region for calculating short-circuit contributions.

2 The user-defined Relay, as specified in the bus/enclosure editor, is not connected to an energized phase CT or has no interlock PDs.

3 The user-defined fault clearing PD, as specified in the bus/enclosure editor, is not energized.

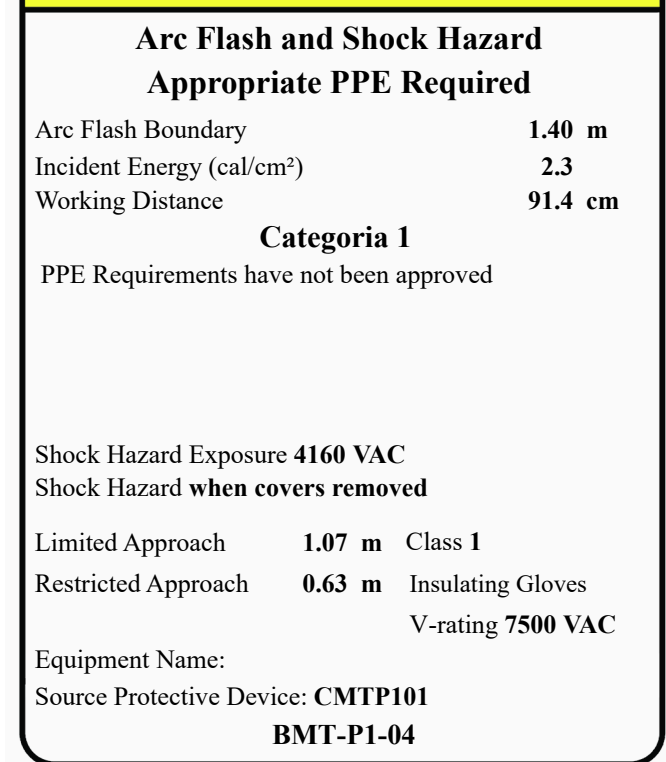
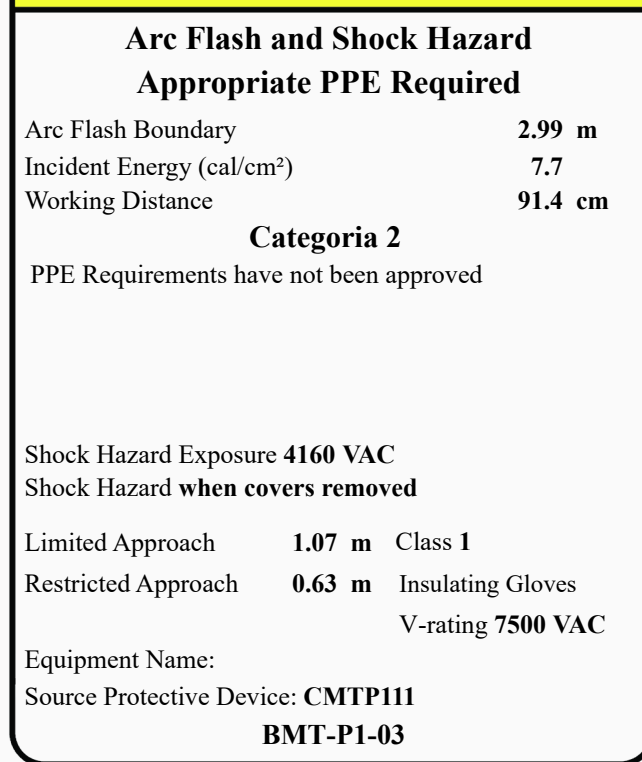
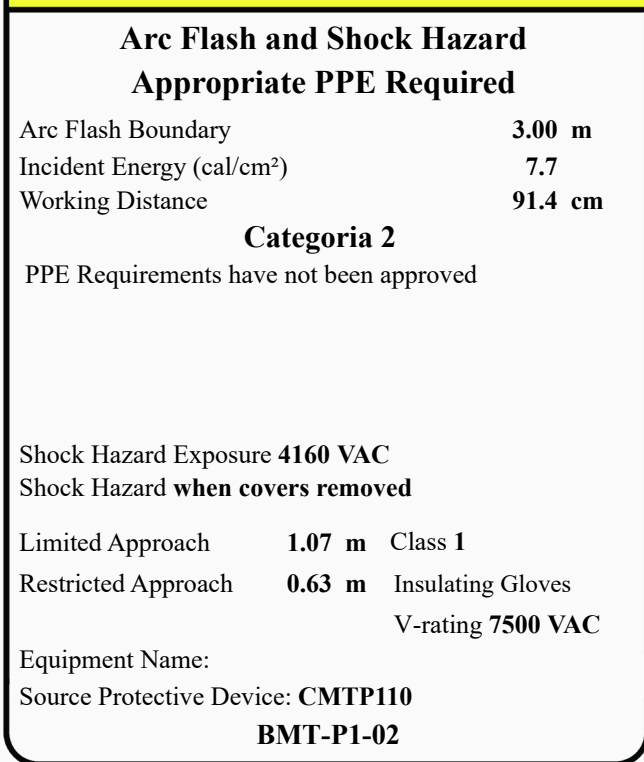
Bus Incident Energy Summary

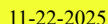
Bus			Total Fault Current (kA)		Arc-Flash Analysis Results			
ID	Nom. kV	Type	Bolted	Arcing	FCT (cycles)	Incident E (cal/cm²)	AFB (m)	Energy Level
BMT-P1-1	10.000	Other	8.480	7.713	75.210	13.615	4.30	Categoria 3
BMT-P1-02	4.160	Other	7.752	6.790	46.123	7.735	3.00	Categoria 2
BMT-P1-03	4.160	Other	7.719	6.762	46.108	7.701	2.99	Categoria 2
BMT-P1-04	4.160	Other	10.171	8.868	10.800	2.350	1.40	Categoria 1
BMT-P1-05	4.160	Other	10.171	8.868				
BMT-P2-01	10.000	Other	8.571	7.698	59.114	10.678	3.68	Categoria 3
BMT-P2-02	4.160	Other	5.383	4.738	46.044	5.436	2.39	Categoria 2
BMT-P2-03	4.160	Other	4.969	4.378	46.006	5.029	2.28	Categoria 2

Estudios eléctricos

Bus Arc Flash Hazard Analysis Summary

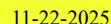
Faulted Bus				Fault Current			Trip Device				Arc Flash Boundary (m)	Incident Energy (cal/cm²)	Working Distance (cm)	Energy Level
ID	Nom. kV	Equipment Type	Gap (mm)	Bolted Fault (kA) Bus	PD PD	PD Arc Fault (kA)	Source Trip Device ID	Trip (cycle)	Open (cycle)	FCT (cycle)				
BMT-P1-1	10.000	Other	152	8.480	1.787	1.626	CMTP112	70.41	4.80	75.21	4.3	13.6	91	Categoria 3
BMT-P1-02	4.160	Other	104	7.752	4.187	3.667	CMTP110	41.32	4.80	46.12	3.0	7.7	91	Categoria 2
BMT-P1-03	4.160	Other	104	7.719	4.189	3.670	CMTP111	41.31	4.80	46.11	3.0	7.7	91	Categoria 2
BMT-P1-04	4.160	Other	104	10.171	1.298	1.132	CMTP101	6.00	4.80	10.80	1.4	2.3	91	Categoria 1
BMT-P1-05	4.160	Other	104	10.171							0.0	0.0	91	
BMT-P2-01	10.000	Other	152	8.571	0.790	0.709	CMTP102	54.31	4.80	59.11	3.7	10.7	91	Categoria 3
BMT-P2-02	4.160	Other	104	5.383	4.182	3.681	CMTP207	41.24	4.80	46.04	2.4	5.4	91	Categoria 2
BMT-P2-03	4.160	Other	104	4.969	4.186	3.687	CMTP208	41.21	4.80	46.01	2.3	5.0	91	Categoria 2





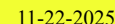
Cannot be Determined

BMT-P1-05



Categoria 3

BMT-P1-1



Categoria 3

BMT-P2-01

