

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

“SIMULACIÓN DE FALLA POR ARCO ELÉCTRICO PARA EVITAR ACCIDENTES MORTALES EN CENTRALES TÉRMICAS”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

ELABORADO POR:

DANIEL JESÚS ALARCÓN MOGOLLÓN

ASESOR:

ING. JAVIER ENRIQUE TAIPE ROJAS

LIMA - PERÚ

2020

DEDICATORIA

“Dedicada a mis padres y hermanos que siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente en cada etapa de mi vida, dándome las herramientas necesarias para cumplir este objetivo de forma satisfactoria”

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Javier Enrique Taipe Rojas, por su disposición a orientarme en el desarrollo de este trabajo, por su dedicación en cada etapa y sus consejos para resolver las dificultades.

A mi familia, por haber recorrido este camino a mi lado, mis padres que siempre estuvieron insistentes en consultar mi progreso desde el ingreso a la universidad, hasta la culminación de dicha etapa.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, por albergarme en sus aulas durante toda la etapa universitaria y permitirme alcanzar un peldaño más en mi carrera profesional.

RESUMEN

En esta tesis, se presenta la simulación de falla por arco eléctrico en las instalaciones eléctricas de una Central Térmica generadora de energía eléctrica, utilizando los estándares internacionales como la Guía para el cálculo de los riesgos derivados del arco eléctrico IEEE 1584 (2002) y la norma sobre seguridad eléctrica en los lugares de trabajo NFPA 70E (2015), con la finalidad de establecer las condiciones de seguridad necesarias para salvaguardar la integridad de los trabajadores cuando se intervienen equipos energizados.

La metodología planteada se fundamenta en el cálculo de la energía incidente que utiliza variables como: tensión, corriente de cortocircuito, distancia entre conductores, duración de arco eléctrico y conexión a tierra; para determinar las medidas de protección adecuadas en cada punto de trabajo, en la cual se establecen distancias de protección contra arco eléctrico además de la categoría de equipo de protección personal correspondiente al nivel de riesgo encontrado; dicha información se plasma en etiquetas de arco eléctrico para el equipo eléctrico que esté sujeto a revisión.

La distancia de protección contra arco eléctrico varía entre 0.23 m en baja tensión hasta 11.56 m en media tensión, cuando no se use Equipo de Protección Personal; además la energía incidente calculada varía desde 0.28 cal/cm² en baja tensión siendo la categoría de EPP nivel 1 para protección contra arco eléctrico, hasta 91.35 cal/cm² en media tensión donde la categoría de EPP es superior al nivel 4 (40 cal/cm²), para este caso la norma NFPA 70E no considera una categoría de riesgo mayor a 40 cal/cm², debido a que sobre ese nivel son más significativos los peligros debido a ondas de sonido y presión, que por los efectos térmicos; siendo necesario en éstos casos intervenir los equipos desenergizados.

ABSTRACT

In this thesis, the simulation of an electric arc fault is presented in the electrical installations of a Thermal Power Plant generating electricity, using international standards such as the Guide for the calculation of the risks arising from the IEEE 1584 (2002) electric arc and the Standard on electrical safety in the workplace NFPA 70E (2015), in order to establish the necessary safety conditions to safeguard the integrity of workers when energized equipment is intervened.

The proposed methodology is based on the calculation of the incident energy that uses variables such as: voltage, short-circuit current, distance between conductors, duration of electric arc and grounding; to determine the appropriate protection measures at each work point, in which electric arc protection distances are established in addition to the category of personal protective equipment corresponding to the level of risk found; this information is reflected in electric arc labels for the electrical equipment that is subject to review.

The electric arc protection distance varies between 0.23 m at low voltage to 11.56 m at medium voltage, when Personal Protective Equipment is not used; In addition the calculated incident energy varies from 0.28 cal/cm² in low voltage being the category of Personal Protective Equipment level 1 for protection against electric arc, up to 91.35 cal/cm² in medium voltage where the EPP category is higher than level 4 (40 cal/cm²), in this case the NFPA 70E standard does not consider a risk category greater than 40 cal/cm², because on that level the hazards due to sound waves and pressure are more significant than thermal effects; being necessary in these cases to intervene the de-energized equipment.

PRÓLOGO

En el transcurso de mi desarrollo profesional, he visto que éste tipo de estudios para simulación de falla por arco eléctrico en específico para una Central Térmica en nuestro país, se vienen considerando principalmente como una exigencia legal, además pude observar que éstos estudios de riesgos por arco eléctrico necesitan documentación previa como los estudios de cortocircuito y ajustes de dispositivos de protección de los equipos además de un diagrama unifilar, el cual muchas veces no se encuentra debidamente actualizada para analizar todos los escenarios posibles respecto a zonificación de riesgos por arco eléctrico, generando una incertidumbre en los cálculos realizados en dichos estudios, debido a que cada cierto tiempo se realizan modificaciones en las instalaciones eléctricas dentro de la planta, el cual modifica los resultados de la simulación de falla por arco eléctrico en dicha central.

En este contexto de crecimiento poblacional, existe una mayor demanda de energía eléctrica el cual necesita ser abastecida en parte por las Centrales Térmicas, por ende se debe realizar mantenimiento a las instalaciones eléctricas incluso estando energizados, habiendo poca información sobre la protección adecuada para intervenir éstos equipos energizados, además del gasto económico dentro del presupuesto del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo de la Central térmica, se debía aprovechar adecuadamente los resultados de la simulación de falla por arco eléctrico, motivo por el cual decidí realizar esta tesis, para determinar condiciones de protección adecuadas en cada punto de trabajo, evitando sobreprotecciones por desconocimiento y principalmente salvaguardar la vida de los trabajadores.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
PRÓLOGO.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS..	IX
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA.....	2
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	2
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.4.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	4
1.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	4
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1 MARCO TEÓRICO.....	5
2.2 MARCO LEGAL.....	9
2.3 INFORMACIÓN UTILIZADA.....	10
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	11
3.1 CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SEGÚN NFPA 70E.....	11
3.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SEGÚN IEEE 1584.....	18
3.2.1 RANGO DEL MODELO.....	21
3.2.2 CORRIENTE DE ARCO.....	23
3.2.3 ENERGÍA INCIDENTE NORMALIZADA.....	24
3.2.4 ENERGÍA INCIDENTE.....	24
3.2.5 FRONTERA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO.....	26

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EN ESTUDIO.....	27
3.3.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	32
3.3.2 AJUSTES DE LOS RELÉS DE PROTECCIÓN.....	35
3.3.3 ESCENARIOS DE OPERACIÓN.....	38
3.3.4 EQUIVALENTE DE THEVENIN DEL SEIN.....	38
CAPÍTULO IV: CÁLCULO DE ENERGÍA INCIDENTE.....	40
4.1 UNIDAD DE GENERACIÓN G1.....	40
4.2 UNIDAD DE GENERACIÓN G2.....	54
4.3 UNIDAD GENERADORA Y TRANSFORMADORES G3 Y G4.....	67
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
5.1 RESULTADOS EN UNIDADES DE GENERACIÓN G1,G2,G3 Y G4.....	80
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
CONCLUSIONES.....	84
RECOMENDACIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86
ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clases de guantes.....	16
Tabla 2: Ropa de protección Equipo de Protección Personal.....	17
Tabla 3: Clases de equipos y separaciones típicas entre barras.....	19
Tabla 4: Distancias típicas de trabajo.....	20
Tabla 5 Factores de equipos y clase de voltaje.....	25
Tabla 6: Instalaciones en análisis de la unidad G1.....	29
Tabla 7: Instalaciones en análisis de la unidad G2.....	30
Tabla 8: Instalaciones en análisis de la unidad G3 y G4.....	31
Tabla 9: Parámetros de los transformadores de potencia G1.....	32
Tabla 10: Parámetros de los transformadores de potencia G2.....	32
Tabla 11: Parámetros de los transformadores de potencia G3 y G4.....	33
Tabla 12: Parámetros de generadores.....	33
Tabla 13: Corriente de Cortocircuito de la Central Térmica.....	34
Tabla 14: Resumen de ajustes de unidad de Generación G1.....	35
Tabla 15: Resumen de ajustes de unidad de Generación G2.....	36
Tabla 16: Resumen de ajustes de unidad de Generación G3 y G4.....	37
Tabla 17: Escenario analizado.....	38
Tabla 18: Parámetros equivalentes de Thevenin del SEIN.....	39
Tabla 19: Tabla de resultados en generador G1.....	78
Tabla 20: Tabla de resultados en generador G2.....	79
Tabla 21: Tabla de resultados en generador G3 y G4.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Límites de aproximación (Fuente NFPA 70E).....	12
Figura 2: Diagrama de secuencia de cálculo de energía incidente.....	21
Figura 3: Diagrama de secuencia para determinar categoría de EPP.....	22
Figura 4: Distribución de la Central Térmica.....	27
Figura 5: Etiqueta de arco eléctrico.....	85
Figura 6: Barra 4.16 kV TG1.....	86
Figura 7: Barra 4.16 kV TG2.....	86
Figura 8: Diagrama Unifilar Central Térmica.....	87
Figura 9: Resultados del estudio de arco eléctrico.....	88
Figura 10: Cálculo de energía incidente.....	90

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La Central Térmica dispone de celdas y tableros eléctricos para su funcionamiento, cuya operación y mantenimiento en condiciones inseguras presenta un alto riesgo de daño a los equipos y al personal por riesgo de arco eléctrico (arc flash).

Debido a la necesidad de priorizar la protección de los trabajadores sobre los equipos eléctricos, se hace necesario utilizar las protecciones adecuadas como medida preventiva ante los posibles riesgos a los que se encuentran expuestos por consecuencia del arco eléctrico al intervenir equipos eléctricos energizados.

En el presente documento se desarrollan los análisis necesarios para cubrir este requerimiento, partiendo desde el análisis de las fallas eléctricas como causales del arco eléctrico y la coordinación de protecciones como mecanismo para una adecuada operación de los sistemas de protección.

En el Capítulo III se presenta la metodología desarrollada, aplicando la normativa NFPA 70E (2015) y el estándar IEEE 1584 (2002) para finalmente en el Capítulo IV realizar los cálculos de energía incidente que permite determinar la categoría de Equipo de Protección Personal (EPP) y la distancia límite de protección contra arco eléctrico en cada punto de trabajo.

1.2 PROBLEMÁTICA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

- La seguridad de los trabajadores es vulnerable cuando se realizan tareas críticas que involucran manipular equipos energizados, ante una posible falla por arco eléctrico debido a las consecuencias negativas para los trabajadores, incluso llegando a ocasionar accidentes mortales si no se establecen las condiciones de seguridad adecuadas en las subestaciones eléctricas de la Central Térmica en estudio.
¿Aplicando la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE 1584 se podrá determinar las condiciones de seguridad para intervenir equipos energizados ante una falla por arco eléctrico?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- Durante los trabajos realizados en equipos eléctricos energizados se desconoce la categoría de Equipo de Protección Personal que debe usar el trabajador expuesto a riesgo de arco eléctrico, por lo cual podría sufrir lesiones y quemaduras graves que comprometen la integridad del trabajador.
¿Cuál será la categoría de Equipo de Protección Personal adecuada para intervenir equipos energizados ante riesgo por arco eléctrico?
- Al entorno del equipo energizado intervenido se establece un perímetro de seguridad, sin embargo, se desconoce la distancia límite de protección contra arco eléctrico en la cual el trabajador no puede ingresar sin el Equipo de Protección Personal adecuado; si este límite es excedido se produciría desde quemaduras graves hasta accidentes mortales.
¿Cuál será la distancia límite de protección contra arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado para una persona que se encuentre expuesta, sin ninguna clase de protección?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVOS GENERAL

- Determinar las condiciones de seguridad adecuadas para el trabajador que interviene equipos energizados simulando una falla por arco eléctrico usando los cálculos de la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE1584.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar la categoría de Equipo de Protección Personal a utilizar en trabajos con equipos energizados de acuerdo al riesgo por arco eléctrico que permita salvaguardar la integridad de los trabajadores, aplicando la Normativa NFPA 70E.
- Determinar la distancia límite de protección ante un arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado, aplicando el estándar IEEE1584.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 HIPÓTESIS GENERAL

- Aplicando la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE1584 se determina las condiciones de seguridad necesarias para intervenir equipos energizados ante una falla de arco eléctrico en las subestaciones eléctricas de la Central Térmica en estudio.

1.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Aplicando la Normativa NFPA 70E se define la categoría Equipo de Protección Personal de acuerdo al riesgo por arco eléctrico permitiendo salvaguarda la integridad de los trabajadores en las diversas labores de mantenimiento y pruebas eléctricas en equipos energizados.
- Aplicando el estándar IEEE 1584 se determina el límite de protección de arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado, para una persona que se encuentre expuesta sin ninguna clase de protección.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 MARCO TEÓRICO

Los conceptos de esta tesis están basados en la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE1584.

a) Análisis de arco eléctrico (IEEE 1584-2002)

Un método para determinar el riesgo de daños personales como resultado de la exposición a la energía incidente de un arco eléctrico.

b) Arco eléctrico (NFPA 70E-2015)

Cuando una corriente eléctrica pasa a través del aire entre conductores sin conexión a tierra o entre conductores sin conexión a tierra y conductores a tierra, las temperaturas pueden alcanzar los 35,000 ° F. La exposición a estas temperaturas extremas quema la piel directamente y provoca la ignición de la ropa, lo que se suma a la lesión por quemadura.

Causas del arco eléctrico

El arco eléctrico puede ser iniciado por:

- Impurezas y polvo

Facilita un recorrido para la corriente, generando un destello y creando el arco eléctrico por medio de la superficie.

- Corrosión.

Los equipos en corrosión pueden aportar impurezas sobre la superficie del aislamiento.

- Contactos accidentales

El contacto accidental con elementos conductores expuestos puede iniciar el arco de una falla.

- Caída de herramienta

La caída de herramienta debido a una inadecuada operación puede causar un cortocircuito iniciando una falla de arco eléctrico.

c) Central Termoeléctrica (OSINERGMIN 2014)

Es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica partir de la energía liberada por combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón, el calor generado se usa como parte de un ciclo termodinámico para mover un alternador y generar energía eléctrica, liberando gases de combustión.

d) Circuito. (IEEE 1584-2002)

Un conductor o sistema de conductores a través del cual se pretende que fluya una corriente eléctrica.

e) Corriente de falla disponible (IEEE 1584-2002)

La corriente eléctrica que puede proporcionar la empresa de servicios públicos y los dispositivos de generación eléctrica propiedad de la instalación y los motores eléctricos grandes, teniendo en cuenta la cantidad de impedancia en la ruta de corriente.

f) Corriente de falla (IEEE 1584-2002)

Una corriente que fluye de un conductor a tierra o a otro conductor debido a una conexión anormal (incluyendo un arco) entre los dos.

g) Energía incidente (IEEE 1584-2002)

La cantidad de energía disipada sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante un evento de arco eléctrico. La unidad de medida es Julios por centímetro cuadrado (J/cm^2) o Calorías por centímetro cuadrado (Cal/cm^2)

h) Estudio de coordinación de Protecciones (NFPA 70E-2015)

Brinda información de las corrientes de cortocircuito monofásico y trifásico de los diferentes escenarios, son necesarios para seleccionar o verificar las

características de liberación de fallas de los dispositivos tales como: fusibles, interruptores, y reveladores usados en el esquema de protección.

i) Frontera de protección (NFPA 70E-2015)

Las fronteras de protección son:

- Frontera de protección de arco, es cuando se puede dar un arco eléctrico por destello, un límite de aproximación a una distancia de una posible dentro de la cual una persona puede recibir una quemadura de segundo grado por arco eléctrico.
- Frontera de aproximación limitada, una aproximación limitada es una distancia de una exposición de un conductor eléctrico o una parte de un circuito dentro del cual existe peligro por choque eléctrico.
- Frontera de aproximación restringida, es la distancia a una exposición de un conductor eléctrico energizado o parte del circuito energizado dentro de la cual aumenta el riesgo de choque, debido a arco eléctrico ocasionado por movimientos involuntarios, para el personal que trabaja cerca del conductor expuesto.

j) Relé eléctrico (MINEM 2002)

Dispositivo diseñado para producir cambios predeterminados y repentinos en uno o más circuitos eléctricos de salida cuando se cumplen con ciertas condiciones en los circuitos eléctricos de entrada que controlan el dispositivo.

k) Sobrecorriente (NFPA 70E-2015)

Cualquier corriente superior a la corriente nominal del equipo o la capacidad de corriente de un conductor. Puede resultar de la sobrecarga, cortocircuito, o de fallo de tierra.

l) Subestación (MINEM 2002)

Parte de una red eléctrica, limitada a un área dada, incluyendo principalmente terminales de las líneas de transmisión o distribución, aparata (equipos de maniobra y control), edificaciones y transformadores. Una estación generalmente incluye dispositivos de seguridad y control.

m) Transformador de potencia (MINEM 2002)

Aparato estático con dos o más devanados que, mediante inducción electromagnética, transforma un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de tensión y corriente generalmente de diferentes valores y a la misma frecuencia con el fin de transmitir la potencia eléctrica.

2.2 MARCO LEGAL

- Ley 29783. Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- D.S. 005-2012-TR. Reglamento de la ley de seguridad y salud en el trabajo.
- R.M. 111-2013 MEM. Reglamento de Seguridad y Salud en el trabajo con electricidad.

Este documento establece los requisitos de seguridad para el uso de la ropa de trabajo debiendo ser resistente al arco eléctrico de acuerdo a las exigencias de la actividad a desarrollar en los equipos e instalaciones eléctricas.

- R.M. 0911-2002 EM/DGE. Terminología en electricidad.
- NFPA. Asociación Nacional para la Protección Contra Incendio a través de su estándar NFPA 70E: Estándar para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. Este estándar requiere la realización de un estudio de relámpago de arco para proteger al personal de trabajo de la posibilidad de ser afectado por este suceso. Además, se definen los Equipos de Protección Personal de acuerdo a las categorías de riesgo.
- IEEE. Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica a través de su estándar IEEE Std.1584: Guía para el cálculo de los riesgos derivados del arco eléctrico. El propósito de esta guía es proporcionar técnicas (metodologías de cálculo) para determinar la energía incidente y la distancia de arco eléctrico, al que están expuestos los trabajadores que ejecutan actividades cerca o en equipos eléctricos, para sistemas de 0,208 kV a 15 kV.
- OSHA. Administración de Seguridad y Salud Ocupacional
Esta agencia departamental de los Estados Unidos en coordinación con el comité de Seguridad Eléctrica del NEC (National Electrical Code) se creó la Normativa NFPA 70 donde se incluye los requisitos de etiquetado para los equipos eléctricos, para advertir a los trabajadores sobre el peligro de arco eléctrico.

2.3 INFORMACIÓN UTILIZADA

Se realizó una visita a las instalaciones de la central Térmica para recopilar información que permita realizar el modelado del sistema eléctrico.

Se presenta el registro fotográfico de la visita a campo (Anexo 2). Esta información fue validada y complementada con la siguiente documentación proporcionada por la Central:

- Diagrama unifilar de la Central Térmica (Anexo 3).
- Información de Parámetros eléctricos de los grupos de generación de la Central Térmica.
- Diagrama unifilar de protecciones actualizado.
- Ajustes de protección de los relés existente en el sistema eléctrico.
- Estudio de coordinación de protecciones de la Central Térmica.

Los procedimientos y recomendaciones para el desarrollo del estudio de arco eléctrico, se basaron en los siguientes estándares:

- NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace. 2015 Edition.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Standard 1584, Guide for Performinig Arc Flash Hazard Calculations. 2002.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Según Hernández-Sampieri (2014) respecto a la metodología de investigación aplica las siguientes definiciones:

- Estudio causa-efecto, se aplicará la norma NFPA 70E (2015) para determinar la categoría de Equipo de Protección Personal; y el estándar IEEE 1584 (2002) para determinar la distancia límite de protección contra arco eléctrico.
- Enfoque cuantitativo, se presenta de forma secuencial, en un orden establecido para realizar los cálculos en base a métodos estadísticos en una Central Térmica.
- Diseño no experimental, no se manipula ninguna norma o estándar para determinar la categoría de Equipo de Protección Personal o distancia límite de protección contra arco eléctrico; solo se aplica la metodología establecida en dichas normas.

Los cálculos determinados en esta tesis se pueden comprobar utilizando el Software ETAP tal como se muestra en la figura 9, donde se presenta los resultados del Software ETAP en TG1 (Anexo 4).

3.1 CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SEGÚN NFPA 70E

La NFPA 70E menciona y hace referencia que es aplicable a tensiones de 208V-600V para instalaciones eléctricas al aire y en lugares cerrados asimismo se considera líneas y cables eléctricos con niveles de tensión de operación entre 1 kV-800kV y considerando niveles de corriente de cortocircuito de 16-50kA.

El NFPA-70E a partir de los niveles de falla presentes en un tablero y de la velocidad con la que operan los elementos de interrupción, proporciona la metodología para calcular la energía calorífica potencial presente (cal/cm^2) y define la categoría de Equipo de Protección Personal respecto al nivel de energía incidente calculado, tal como se muestra en la tabla de Ropa de Protección y Equipo de protección Personal como se muestra en la Tabla 2.

La información de seguridad se imprime en una etiqueta de arco eléctrico (Anexo 1) de material adecuado que se pega en cada tablero eléctrico.

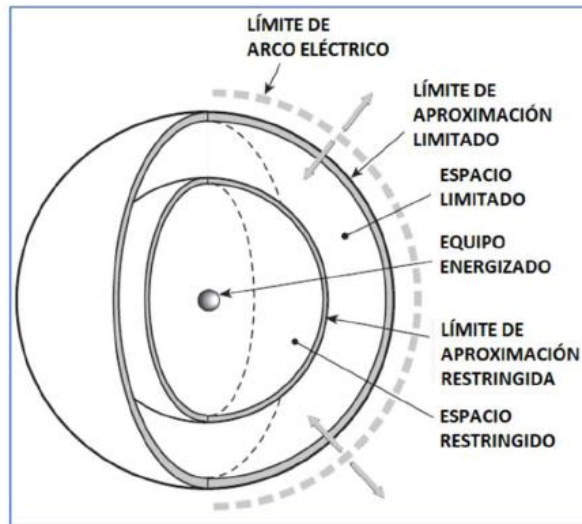


Figura 1. Límites de aproximación, Fuente: NFPA 70E 2015.

La figura 1, muestra claramente los límites de protección contra el arco eléctrico, de esta manera podemos observar que entre más cercano este el personal a un punto donde ocurra la falla, la energía incidente aumenta.

La distancia de frontera de protección contra arco eléctrico es calculada en base a la siguiente formula presentada en la NFPA 70E:

$$D_c = [2.65 \times MVA_{bf} \times t]^{1/2} \quad (1)$$

$$D_c = 53 \times MVA \times t^{1/2} \quad (2)$$

Dónde:

D_c : Distancia a la que se causa una quemadura de segundo grado en una persona (pies).

MVA_{bf} = Los MVA del punto de falla.

MVA = Los MVA nominales del transformador (para transformadores con valores nominales menores de 0.75 MVA, multiplicar los MVA nominales del transformador por 1.25).

t = Tiempo de exposición del arco en segundos.

El tiempo de liberación de la falla de un fusible limitador de corriente es de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo o 0.0004 segundos si la corriente de arco está dentro de su capacidad de limitación de corriente.

El tiempo de liberación de la falla de la unidad de disparo para un interruptor automático de 5 kV y 15 kV es aproximadamente 0.1 segundos o 6 ciclos si la función instantánea está habilitada. Esto se puede desglosar de la siguiente manera: tiempo real del interruptor (aproximadamente 2 ciclos), más el tiempo de operación del relevador de aproximadamente 1.74 ciclos, más un margen de seguridad de 2 ciclos, que es tiempo total de aproximadamente 6 ciclos.

Los parámetros requeridos para hacer el cálculo son:

- Máxima corriente de falla de cortocircuito trifásico y el nivel de falla mínimo al que el arco eléctrico se mantendrá. Para los sistemas a 480 volts, la industria aceptó un nivel mínimo para sostener el arco eléctrico de 38% de la posible falla de corto circuito trifásico.
- El tiempo total que le lleva al dispositivo de protección hacer la liberación a la máxima corriente de cortocircuito y al mínimo nivel de falla en el cual el arco se auto sostendrá.
- La distancia del trabajador desde la fuente de arco eléctrico para la tarea que va a realizarse.

Determinar si el trabajo se llevará a cabo al aire o dentro de un recinto.

Utilizar la siguiente formula presentada en la NFPA 70E:

Arco abierto al aire libre 600 volts

$$E_{MA} = (5271)D_A^{-1.9593} t_A [0.0016 F^2 - 0.0076F + 0.8938] \quad (3)$$

Dónde:

E_{MA} = Máxima energía incidente del arco abierto, cal/cm²

D_A = Distancia a los electrodos de arco, pulgadas (para distancias de 18

pulgadas y mayores)

t_A = Duración del arco en segundos.

F = Corriente de cortocircuito de falla trifásica, (para el rango de 16 kA a 50 kA)

Arco en una caja cúbica (arco en caja) hasta 600 volts

Esta ecuación es aplicable a relámpagos de arco que provienen de adentro de: equipos de maniobra, centro de control de motores u otros encerramientos similares de equipos eléctricos, formula presentada en la NFPA 70E.

$$E_{MB} = (1038)D_B^{-1.4738} t_A [0.0093 F^2 - 0.3453F + 5.9675] \quad (4)$$

Dónde:

E_{MB} = Máxima energía incidente en caja cúbica, de 508 mm por lado en, cal/cm²

D_B = Distancia a los electrodos de arco, pulgadas (para distancias de 18 pulgadas y mayores)

t_A = Duración del arco en segundos.

F = Corriente de cortocircuito de falla sólida, kA (para el rango de 16 kA a 50 kA)

Energía incidente a tensión superior a 600 V

Energía incidente producida por un arco trifásico abierto en sistemas con valores nominales superiores a 600 V, formula presentada en la NFPA 70E.

$$E = 793x F x V x t_A / D^2 \quad (5)$$

Donde

E = Energía incidente, cal/cm²

D = Distancia a la fuente de arco, pulgadas.

t_A = Duración del arco en segundos.

F = Corriente de cortocircuito de falla sólida, kA

V = Tensión de fase a fase del sistema, kV.

Con este algoritmo se determina el nivel de energía incidente en cal/cm^2 .

Si la energía incidente calculada a partir de las ecuaciones anteriores es menor a 1.2 cal/cm^2 , la ropa retardante al fuego puede no ser requerida para prevenir quemaduras, aunque la protección puede ser necesaria para otros riesgos.

Determinar la Categoría peligro riesgo (CPR) y seleccionar el nivel apropiado de Equipo de Protección Personal de los cálculos de energía incidente cuando la energía incidente excede las 40 cal/cm^2 en la distancia de trabajo, se dará un gran énfasis a trabajar sin energía, antes de trabajar dentro de la frontera de límite de aproximación de exposición eléctrica a los conductores o partes del circuito energizado.

Según la NFPA 70E, una vez realizados los cálculos de la energía incidente de un arco eléctrico, se podrá escoger la ropa y EPP necesarios de acuerdo al tipo de exposición para cada trabajo en cada escenario determinado. El Equipo de Protección Personal (EPP) consta de diferentes componentes, tales como guantes, herramientas, máscaras de protección de cara, lentes, así como la ropa a utilizar.

Las principales consecuencias del arco eléctrico son quemaduras al cuerpo que podrían causar la muerte, por lo tanto, la cabeza y las áreas del pecho son las más críticas; mientras que las quemaduras en los miembros de la persona son serias, pero no son probables de causar la muerte. Por ejemplo, al trabajar con equipos eléctricos, los guantes son clasificados de acuerdo al nivel de voltaje para proteger contra choques eléctricos (Ver Tabla 1).

Tabla 1

Clases de guantes

CLASE DE GUANTES	NIVEL DE TENSIÓN (KV)
00	0.5
0	1.0
1	7.5
2	17.5
3	26.5
4	36.0

Fuente: Stándar Specification for Rubber Insulating Gloves, ASTM Std D120-02a

La Tabla 2 que se presenta a continuación, obtenida de la Tabla 130.7(c)(16) NFPA 70E-2015 proporciona una guía para determinar la categoría de Equipo de Protección Personal de acuerdo al nivel de energía incidente calculado.

Tabla 2*Ropa de protección y Equipo de protección personal*

Cat.	Energía Incidente calculada	Mínimo Rango PPE	Ropa Requerida
1	0 - 4 cal/cm ²	4 cal/cm ²	<p>Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima de arco de 4 cal / cm²</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisa de manga larga con calificación de arco y pantalones de overol con calificación de arco - Protector facial con arco o capucha con traje de arco eléctrico - Chaqueta, parka, ropa impermeable o forro para casco (AN) con clasificación de arco. <p>Equipo de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> - Casco de seguridad - Gafas de seguridad o gafas de seguridad (SR) - Protección auditiva (inserciones del canal auditivo) - Guantes de cuero resistentes - Calzado de cuero (AN)
2	4 - 8 cal/cm ²	8 cal/cm ²	<p>Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima de arco de 8 cal / cm²</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisa de manga larga con calificación de arco y pantalones de overol con calificación de arco - Capucha con traje de flash con clasificación de arco o careta con clasificación de arco y pasamontañas con clasificación de arco - Chaqueta, parka, ropa impermeable o forro para casco (AN) con clasificación de arco <p>Equipo de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> - Casco Gafas de seguridad o Gafas de seguridad (SR) - Protección auditiva (inserciones del canal auditivo) - Guantes de cuero resistentes - Calzado de cuero (AN)
3	8 - 25 cal/cm ²	25 cal/cm ²	<p>Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima de arco de 25 cal / cm²</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisa de manga larga con clasificación de arco (AR) - Pantalones con clasificación de arco (AR) - Overol con clasificación de arco (AR) - Chaqueta de traje de arco eléctrico con clasificación de arco (AR) - Pantalones de traje de arco eléctrico con clasificación de arco (AR) - Capucha con traje de arco eléctrico con clasificación de arco - Guantes con arcos - Chaqueta, parka, ropa impermeable o forro para casco (AN) con clasificación de arco <p>Equipo de protección</p> <ul style="list-style-type: none"> - Casco de seguridad - Gafas de seguridad o gafas de seguridad (SR) - Protección auditiva (inserciones del canal auditivo) - calzado de cuero
4	25 - 40 cal/cm ²	40 cal/cm ²	<p>Ropa con clasificación de arco, clasificación mínima de arco de 40 cal / cm²</p> <ul style="list-style-type: none"> - Camisa de manga larga con clasificación de arco (AR) - Pantalones con clasificación de arco (AR) - Overol con clasificación de arco (AR) - Chaqueta de traje de arco eléctrico con clasificación de arco (AR) - Pantalones de traje de arco eléctrico con clasificación de arco (AR) - Capucha con traje de arco eléctrico con clasificación de arco - Guantes con arcos - Chaqueta, parka, ropa impermeable o forro para casco (AN) con clasificación de arco <p>Equipo de Protección</p> <ul style="list-style-type: none"> - Casco de seguridad - Gafas de seguridad o gafas de seguridad (SR) - Protección auditiva (inserciones del canal auditivo) - calzado de cuero

AN: según sea necesario (opcional). AR: según sea necesario. SR: selección requerida.

Fuente: Tabla 130.7(c)(16) NFPA 70E-2015

3.1 CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE SEGÚN IEEE 1584

Para realizar el procedimiento de cálculo adecuado del riesgo eléctrico se deben seguir los siguientes pasos:

A. Recopilar datos del sistema eléctrico

Se debe tener en cuenta los diagramas unifilares de la instalación actualizados, si en caso de no presentar dicha información debe ser realizar un levantamiento de información.

B. Identificar los posibles modos de operación del sistema

Se debe contar con información de la corriente de falla para los diferentes modos de operación de la instalación.

C. Determinar la corriente de falla en cada punto del sistema

Se deberá desarrollar un estudio de cortocircuito para la instalación eléctrica.

D. Determinar las corrientes de falla de arco eléctrico.

Se calcula en base a la corriente de falla trifásica analizada en el punto de interés.

E. Analizar las características de los dispositivos de protección y el tiempo de duración del arco

Se calcula el tiempo de actuación de los dispositivos de protección para liberar la corriente de falla, esto se consigue con un análisis de protecciones.

F. Detallar los voltajes del sistema y la clasificación de los equipos.

Para cada barra, documentar la tensión del sistema y la clase de equipo tal como se muestra en la tabla 3 extraída de la tabla 2 del estándar IEEE 1584-2002, permitiendo la aplicación de ecuaciones basados en separaciones típicas entre barras de equipos estándar, cables y otros.

Tabla 3*Clases de equipos y separaciones típicas entre barras*

Clases de equipo	Separaciones típicas entre barras (mm)
15 KV Switchgear	152
5 KV Switchgear	104
Bajo voltaje Switchgear	32
Bajo voltaje CCM's y Tableros eléctricos	25
Cable	13
Otros	No se requiere

Fuente: Tabla 2 del estándar IEEE 1584-2002.

G. Seleccionar las distancias de trabajo

La cabeza y el cuerpo representan un gran porcentaje de la superficie total de la piel y lesiones a estas áreas pone más en peligro la vida de las personas y daños que pueden causar sus extremidades. Estas distancias típicas de trabajos se muestran en la tabla 4 extraída de la tabla 3 del estándar IEEE 1584-2002.

Tabla 4*Distancias típicas de trabajo*

Clase de equipo	Distancias de trabajo típicas (mm)¹
15 KV Switchgear	910
5 KV Switchgear	910
Bajo voltaje Switchgear	610
Bajo voltaje CCM's y tableros eléctricos	455
Cable	455
Otros	Para ser determinada en el campo

¹ La distancia típica de trabajo es la suma entre el espacio que existe entre el trabajador parado de pie hacia la parte frontal del equipo, y desde la parte frontal del equipo hasta la fuente de arco potencial dentro del equipo.

Fuente: Tabla 3 del estándar IEEE 1584-2002.

H. Determinación de la energía incidente para todos los equipos

La energía incidente se calculará usando las ecuaciones del estándar IEEE 1584-2002.

I. Determinar la frontera de protección contra Arco eléctrico para todos los equipos.

Encontrar la frontera de protección, las ecuaciones para encontrar la energía incidente serán resueltas para una distancia desde la posible fuente del arco eléctrico a donde pueda ocasionar quemaduras de segundo grado en el cuerpo del trabajador.

Para los cálculos de la energía incidente y la distancia límite de protección contra arco eléctrico según el estándar IEEE 1584-2002 se presenta el siguiente diagrama:

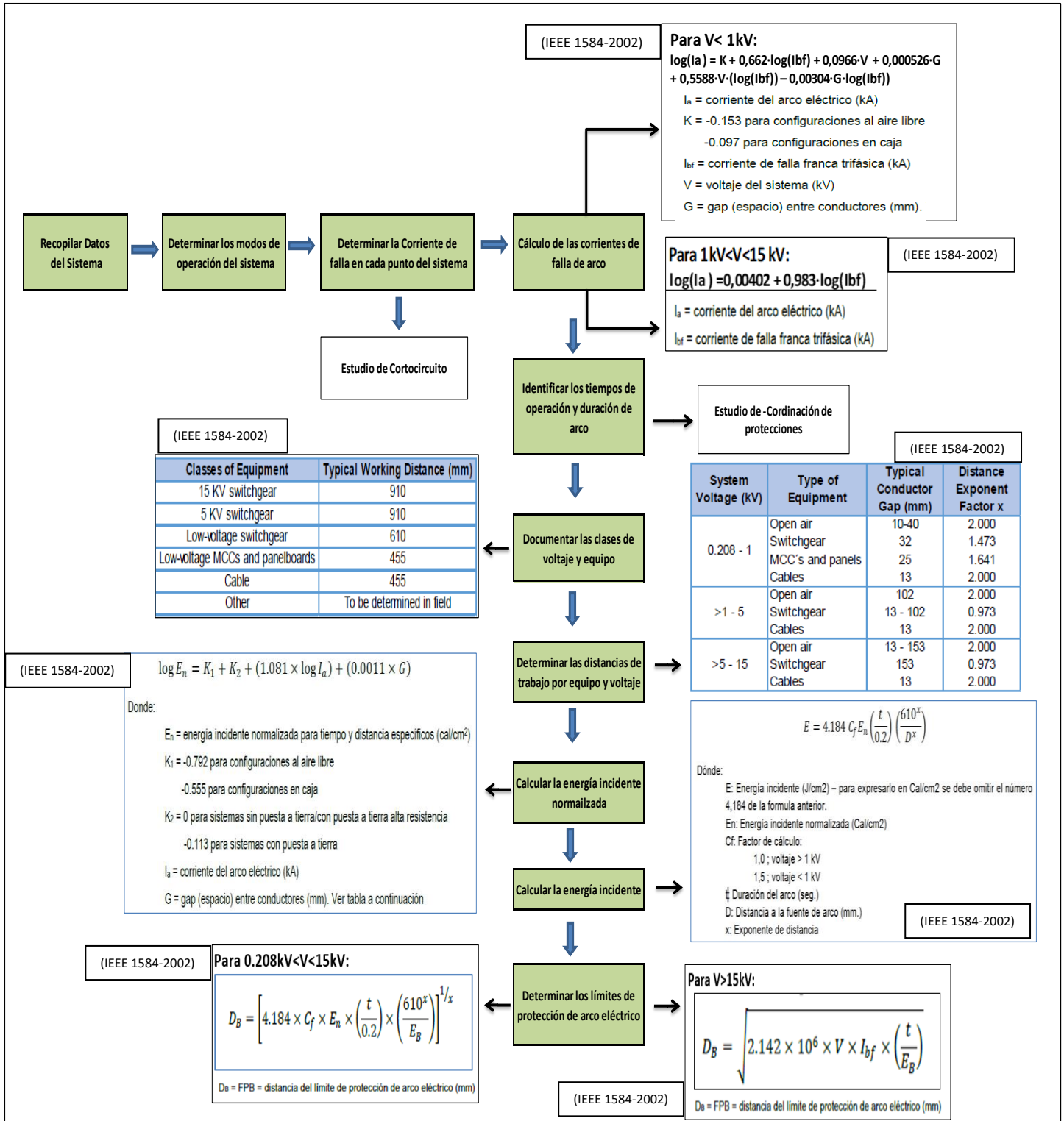


Figura 2. Diagrama de secuencia de cálculo de energía in, Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la categoría de Equipo de Protección Personal según el estándar IEEE 1584-2002 y la norma NFPA 70E-2015 se presenta el siguiente diagrama:

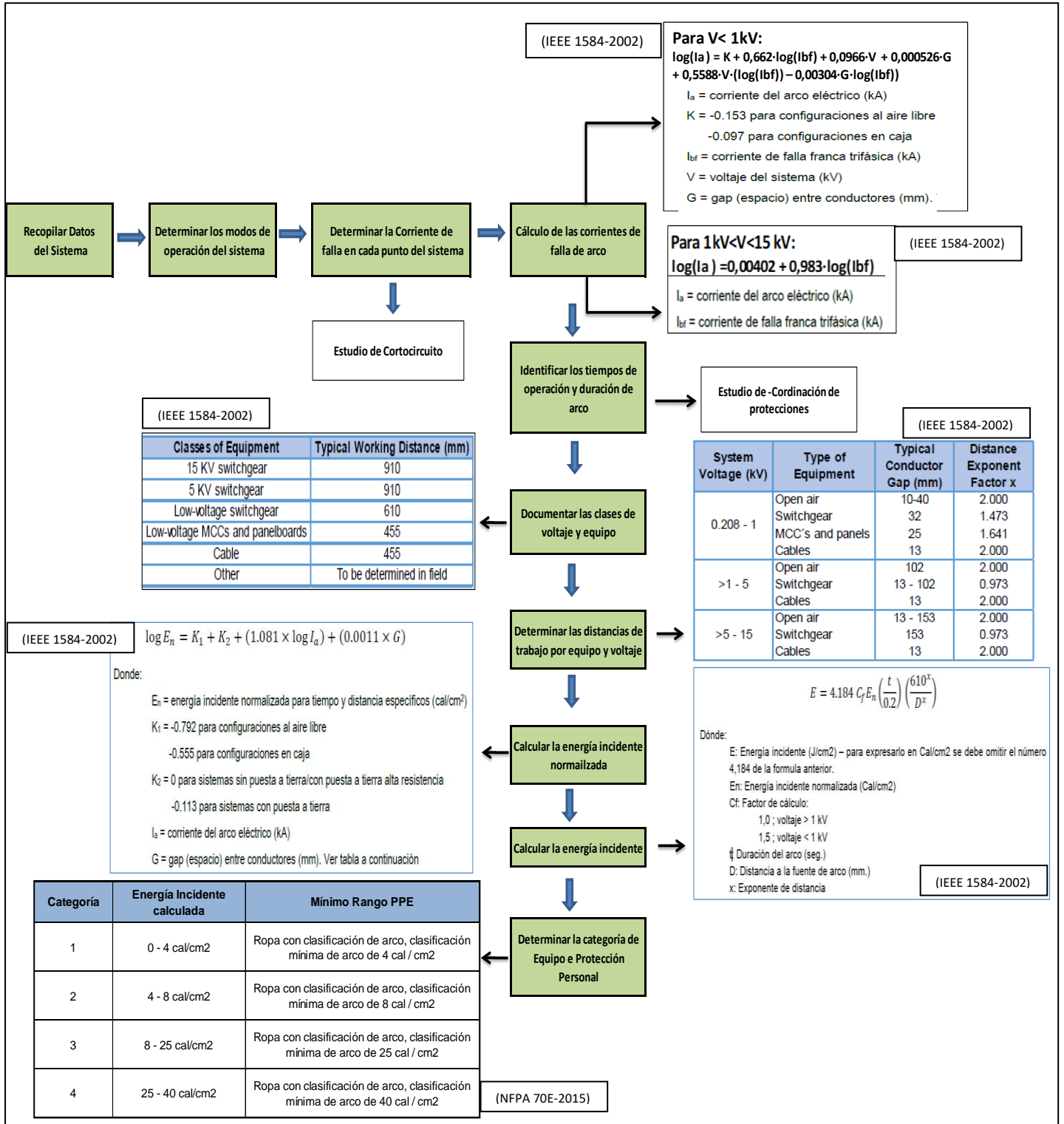


Figura 3. Diagrama de secuencia para determinar categoría de EPP, Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 RANGO DEL MODELO

La IEEE 1584-2002 establece el modelo derivado empíricamente, que basado en los programas de ajuste de curvas y un análisis estadístico, se aplica a los sistemas con las siguientes características:

- Tensión del sistema de 208V a 15 kV en sistema trifásico.
- Frecuencia de 50 a 60 Hz.
- Corriente de falla de 0.7 kA a 106 kA.
- Distancia entre conductores de 13 mm a 152 mm.
- Falla de 3 fases.
- Puesta a tierra de todo tipo y sin conexión a tierra.
- Recintos de equipos de tamaño comúnmente disponibles.

3.2.2 CORRIENTE DE ARCO

La corriente de arco trifásica es determinada en base a los tiempos de accionamiento de los sistemas de protección y se encuentra determinado en base a la corriente de falla trifásica, la tensión nominal del sistema y la separación entre barras o conductores.

Para aplicación de sistemas por debajo de 1000V, se tiene la siguiente ecuación presentada en el estándar IEEE-1584:

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf} \quad \dots\dots(6)$$

Donde:

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- K = -0.153 para configuraciones al aire libre
-0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = espacio entre conductores (mm).

En sistemas de 1000V a más, se tiene la siguiente ecuación presentada en el estándar IEEE-1584:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf} \quad \dots(7)$$

Donde:

I_a = corriente del arco eléctrico (kA)

I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)

3.2.3 ENERGÍA INCIDENTE NORMALIZADA

Esta ecuación toma el dato normalizado para un tiempo de arco de 0.2 segundos y una distancia hacia una persona de 610 mm a un punto posible de arco presentada en el estándar IEEE-1584.

$$\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G \quad \dots(8)$$

Dónde:

E_n = Energía incidente normalizada (cal/cm²) para un tiempo y distancia.

I_a = Corriente de arco.

$K1$ = -0.792; configuración abierta.

= -0.555; configuración en caja.

$K2$ = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.

= -0.113; sistemas aterrizados.

G = Distancia entre conductores. (mm).

3.2.4 ENERGÍA INCIDENTE

Formula presentada en el estándar IEEE-1584:

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad \dots(9)$$

Dónde:

- E = Energía incidente (J/cm²)

- C_f = Factor de Cálculo

= 1.0; tensión > 1kV

= 1.5; tensión < 1kV

- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia. (Ver tabla 5)

Tabla 5*Factores de equipos y clases de voltaje*

Tensión de sistema (kV)	Tipo de equipo	Distancia típica entre los conductores (mm)	Distancia x factor
0.208-1	Aire libre	10-40	2.000
	Tableros	32	1.473
	MCCs y paneles	25	1.641
	Cable	13	2.000
>1-5	Aire libre	102	2.000
	Tableros	131-102	0.973
	MCCs y paneles	13	2.000
>5-15	Aire libre	13-153	2.000
	Tableros	153	0.973
	MCCs y paneles	13	2.000

Fuente: Tabla 4 IEEE 1584-2002

Para casos donde la tensión del sistema es superior a 15kV o la separación está fuera de los rangos del modelo empírico, se puede aplicar el modelo teóricamente derivado de Lee, de donde se obtiene la siguiente fórmula para la energía incidente presentada en el estándar IEEE-1584:

$$E = 2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad \dots(10)$$

Dónde:

- E = Energía incidente (J/cm²)
- V = Tensión del sistema (Kv)
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D: Distancia del posible punto de arco eléctrico hacia el cuerpo de la persona (mm).

- I_{bf} = Corriente de falla trifásica.

3.2.5 FRONTERA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO

Es la distancia entre un elemento conductor expuesto, al cual una persona sin equipo de protección personal podría sufrir una quemadura de segundo grado curable, presentada en el estándar IEEE-1584:

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{EB} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad \dots(11)$$

Para el método Lee, en el caso que la tensión sea mayor a 15 Kv presentada en el estándar IEEE-1584:

$$DB = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{EB} \right)} \quad \dots(12)$$

Dónde:

DB = Es la distancia de frontera del punto de arqueo (mm).

EB = Energía incidente en (J/cm²) a una distancia de frontera.

t = Tiempo de arco (segundos).

V = Tensión del sistema (Kv)

I_{bf} = Corriente de falla franca (kA).

EB puede ser 5.0 J/cm² para una piel o dentro del rango del equipo de protección personal.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EN ESTUDIO

La Central Térmica cuenta con 4 turbinas generadoras de energía: dos turbinas duales de gas/diesel y dos turbinas a diesel; asimismo, se cuenta con calderas de recuperación de calor, torres de enfriamiento, edificios de oficinas, almacenes, procesos secundarios, un patio de llaves, tres transformadores eléctricos principales y otros secundarios. A continuación, se puede observar una imagen satelital de la Central Térmica, con algunas de las áreas más relevantes:



Figura 4. Distribución de la Central Térmica, Recuperado de <https://www.google.com/maps> (2019, 20 de agosto)

La central térmica está constituida los siguientes grupos de generación:

Grupo 1: Consta de una unidad de generación de 215 MVA, con tensión de operación de 16.5 kV. Posee un transformador de 7.5 MVA para su sistema de arranque y servicios auxiliares los cuales operan a una tensión de 4.16 kV; que a su vez se conecta en cascada a un transformador de 2 MVA para alimentar las cargas de 480 voltios de los servicios auxiliares.

Grupo 2: Consta de una unidad de generación de 150 MVA, con tensión de operación de 13.8 kV. Posee un transformador de 3.75 MVA para su sistema de arranque y control. Para los servicios auxiliares existe un transformador de 1 MVA del cual alimenta a sus cargas de 480 voltios.

Grupo 3 Y 4: Consta de dos unidades de generación de 70 MVA cada uno, con tensión de operación de 13.8 kV; las cuales se conectan desde un transformador de potencia de tres devanados. Para los servicios auxiliares cada unidad cuenta con un transformador de 300 KVA el cual alimenta las cargas de 480 voltios.

La Central Térmica se ubica en la zona costa/centro del Sistema Interconectado Nacional (SEIN) y tiene conexión eléctrica con diferentes subestaciones de 220 kV. En esta zona se presenta un elevado nivel de cortocircuito, lo cual se debe al enmallamiento de la red de transmisión y la presencia de centrales de gran capacidad instalada.

El análisis de arco eléctrico se ha realizado en las celdas y tableros de media y baja tensión, en los cuales se podría presentar una exposición potencial de un arco eléctrico hacia los operarios, en los casos donde se realicen trabajos con equipos energizados. Estas instalaciones se detallan en las siguientes tablas y figura.

Tabla 6*Instalaciones en análisis de la unidad G1*

UBICACIÓN	EQUIPO	TIPO	VOLTAJE (Kv)
BARRA PRINCIPAL DE GENERACIÓN	BARRA 11BA_16.5 Kv –G1	Barra	16.5
	GE_SR001 – G1	Interruptor	16.5
		Cables	16.5
	Transformador 11BBT01	Barra	16.5
SALA DE MEDIA VOLTAGE 11UBA03	BARRA 11BEE_4.16KV – G1	Barra	4.16
	Transformador 11BFT01	Interruptor	4.16
		Cables	4.16
	Motor 11MBJ01	Interruptor	4.16
		Cables	4.16
	SALA DE SS.AA. TRANSFERENCIA 11UBA91	BARRA 11BBA 0.48KV – G1	Barra
Salida hacia Sala BOP 11UBA92		Interruptor	0.48
		Cables	0.48
Salida hacia Sala Paquete Eléctrico 11UBA01		Interruptor	0.48
		Cables	0.48
SALA DE BOP 11UBA92		BARRA MCC-BOP 0.48KV G1	Barra
SALA DEL PAQUETE ELÉCTRICO-11UBA01	BARRA Turbina 0.48KV G1	Barra	0.48

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 7*Instalaciones en análisis de la unidad G2*

UBICACIÓN	EQUIPO	TIPO	VOLTAJE (Kv)
BARRA PRINCIPAL DE GENERACIÓN	BARRA DE_13,8 kV – G2	Barra	13.8
	GE_SR001 – G2	Interruptor	13.8
		Cables	13.8
	Barra Transformador Arranque	Barra	13.8
	Barra Transformador SS.AA.	Barra	13.8
BARRA 4.16 KV (11BBE)	Barra Media Tensión G2	Barra	4.16
	Transformador OSMONIC	Interruptor	4.16
		Cables	4.16
	Bomba combustible	Interruptor	4.16
		Cables	4.16
	Motor de Arranque	Interruptor	4.16
		Cables	4.16
	BARRA DE 480 VAC (TRANSFERENCIA)	Barra de Transferencia	Barra
PAQUETE ELÉCTRICO (MCC TURBINA G2)	Paquete Eléctrico MCC Turbina	Barra	0.48
	MCC Turbina	Interruptor	0.48
		Cables	0.48
Sala de SS.AA. G2.	Sala SS.AA G2	Barra	0.48
	Sala de SS.AA.	Interruptor	0.48
		Cables	0.48

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 8*Instalaciones en análisis de la unidad G3 y G4*

UBICACIÓN	EQUIPO	TIPO	VOLTAJE (Kv)
BARRA PRINCIPAL DE GENERACIÓN G3	BARRA DE_13,8 kV – G3	Barra	13.8
	GE_SR003 – G3	Interruptor	13.8
		Cables	13.8
	Transformador SS.AA. G3	Cables	13.8
BARRA PRINCIPAL DE GENERACIÓN G4	BARRA DE_13,8 kV – G4	Barra	13.8
	GE_SR003 – G4	Interruptor	13.8
		Cables	13.8
	Transformador SS.AA. G4	Cables	13.8
BARRA DE 480 VAC (MCC TURBINA G3)	Barra MCC Turbina G3	Barra	0.48
BARRA DE 480 VAC (MCC TURBINA G4)	Barra MCC Turbina G4	Barra	0.48

Fuente: Especificación de fabricante

3.3.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

En las siguientes tablas se muestran los parámetros eléctricos del equipamiento principal de las instalaciones de la Central térmica. Esta información fue proporcionada por la empresa de generación eléctrica.

Tabla 9

Parámetros de transformadores de potencia del grupo 1

TRANSFORMADOR	PARÁMETROS ELÉCTRICOS		
PRINCIPAL DE LA UNIDAD G1	Potencia ONAN1/ONAN2/ONAF	MVA	138/184/230
	Tensión	kV	220/16.5
	Grupo de conexión	-	Ynd1
	Impedancia de CC.	%	14.01 (PB=230 MVA 220kV)
TRANSFORMADOR 11BBT01 (AUXILIAR)	Potencia ONAN/ONAF	MVA	6/7.5
	Tensión	kV	16.5/4.16
	Grupo de conexión	-	Dy1
	Impedancia de CC.	%	7.5 (PB=7.5 MVA 16.5 kV)
TRANSFORMADOR 11BFT01 (4.16/0.48 kV)	Potencia ONAN/ONAF	MVA	1.5/2
	Tensión	kV	4.16/0.48
	Grupo de conexión	-	Dyn1
	Impedancia de CC.	%	5.75 (PB=2 MVA 4.16kV)

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 10

Parámetros de transformadores de potencia del grupo 2

TRANSFORMADOR	PARÁMETROS ELÉCTRICOS		
PRINCIPAL DE LA UNIDAD G2	Potencia	MVA	140
	Tensión	kV	220/13.8
	Grupo de conexión	-	Ynd11
	Impedancia de CC.	%	12.2 (PB=140 MVA 210kV)
ARRANQUE	Potencia	MVA	3.75
	Tensión	kV	13.8/4.16
	Grupo de conexión	-	Dyn1
	Impedancia de CC.	%	7.15 (PB=3.75 MVA 13.8kV)
SERVICIOS AUXILIARES	Potencia	MVA	1
	Tensión	kV	13.8/0.48
	Grupo de conexión	-	Dyn1
	Impedancia de CC.	%	5 (PB=1 MVA 13.8kV)

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 11*Parámetros de transformadores de potencia del grupo 3 y 4*

TRANSFORMADOR	PARÁMETROS ELÉCTRICOS		
PRINCIPAL DE LAS UNIDADES G3 Y G4	Potencia	MVA	3x48
	Tensión	kV	220/13.8/13.8
	Grupo de conexión	-	Ynnd
	Impedancia HV-MV	%	11.6 (PB=144 MVA 220kV)
	Impedancia HV-LV	%	11.6 (PB=144 MVA 220kV)
	Impedancia MV-LV	%	20.8 (PB=72 MVA 13.8kV)
SERVICIOS AUXILIARES G3 Y G4	Potencia	KVA	300
	Tensión	kV	13.8/0.48
	Grupo de conexión	-	Dyn1
	Impedancia de CC.	%	4 (PB=0.3 MVA 13.8kV)

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 12*Parámetros de generadores*

PARAMETROS		GENERADOR G1	GENERADOR G2	GENERADOR G3 y G4
Potencia ONAN/ONAF	MVA	215	150	70.12
Tensión	kV	16.5	13.8	13.8
Grupo de conexión	-	YN	YN	YN
Xd	p.u.	1.7845	1.8129	2.047
Xq	p.u.	1.7382	1.7559	1.965
Resistencia a tierra	-	Transformador de tensión y Resistencia 1112 Ohm	Transformador de tensión y Resistencia 236 Ohm	Transformador de tensión y Resistencia 206 Ohm

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 13
Corriente de cortocircuito de la Central Térmica

EQUIPO	TIPO	NIVEL DE VOLTAJE	CORRIENTE DE FALLA
		kV	kA
BARRA 11BAA_16.5 kV – G1	Barra	16.5	107.74
GE_SR001 – G1	Interruptor	16.5	107.74
	Cables	16.5	107.74
Transformador 11BBT01	Barra	16.5	107.74
BARRA 11BEE_4.16KV – G1	Barra	4.16	17.24
Transformador 11BFT01	Interruptor	4.16	17.24
	Cables	4.16	17.24
Motor 11MBJ01	Interruptor	4.16	17.24
	Cables	4.16	17.24
BARRA 11BBA 0.48KV – G1	Barra	0.48	14.71
Salida hacia Sala BOP 11UBA92	Interruptor	0.48	14.71
	Cables	0.48	14.71
Salida hacia Sala Paquete Eléctrico 11UBA01	Interruptor	0.48	14.71
	Cables	0.48	14.71
BARRA MCC-BOP 0.48KV G1	Barra	0.48	6.99
BARRA Turbina 0.48KV G1	Barra	0.48	10.68
BARRA DE_13,8 kV – G2	Barra	13.8	85.09
GE_SR001 – G2	Interruptor	13.8	85.09
	Cables	13.8	85.09
Barra Transformador Arranque G2	Barra	13.8	85.09
Barra Transformador SSAA G2	Barra	13.8	85.09
BARRA Media Tension G2	Barra	4.16	12
Transformador OSMONIC G2	Interruptor	4.16	12
	Cables	4.16	12
Bomba combustible G2	Interruptor	4.16	12
	Cables	4.16	12
Motor de Arranque G2	Interruptor	4.16	12
	Cables	4.16	12
Barra de Transferencia G2	Barra	0.48	12.21
MCC Turbina G2	Interruptor	0.48	12.21
	Cables	0.48	12.21
Sala SSAA G2	Interruptor	0.48	12.21
	Cables	0.48	12.21
Paquete Electrico MCC Turbina G2	Barra	0.48	10.22
Sala SSAA G2	Barra	0.48	4.47
Barra G3 13.8KV	Barra	13.8	67.87
GE_SR003 – G3	Interruptor	13.8	67.87
	Cables	13.8	67.87
Transformador SSAA G3	Cables	13.8	67.87
Barra G4 13.8KV	Barra	13.8	67.87
GE_SR003 – G4	Interruptor	13.8	67.87
	Cables	13.8	67.87
Transformador SSAA G4	Cables	13.8	67.87
Barra MCC Turbina G4	Barra	0.48	5.2
Barra MCC Turbina G4	Barra	0.48	5.34

Fuente: Especificación de la Central Térmica

3.3.2 AJUSTES DE LOS RELÉS DE PROTECCIÓN

Es importante para los cálculos relacionados al arco eléctrico. Por ejemplo, para corrientes de falla bajas, el tiempo de disparo puede ser alto debido a la relación inversa tiempo-corriente de las curvas de protección, esto afecta al valor de energía incidente.

Tabla 14

Resumen ajustes unidad de generación G1

UNIDAD G1					
EQUIPO PROTEGIDO	TIPO DE PROTECCIÓN	FUNCIONES		RELE	AJUSTES
	Tipo de perturbación	Protección	ANSI	Modelo	
GENERADOR	Cortocircuito	Diferencial Generador	87G	7UT623	0.1 I/In t = Instantáneo
		Sobrecorriente con restricción de tensión	51V	BE1-51/27 C (B6 - Muy Inverso)	2.25 A 90 V Time Dial = 30
	Cortocircuito Tierra Estator (95%)	Falla Tierra Estator	59N	BE1-59N	8 V Time Dial = 50 Curva Inversa
	Carga Asimétrica	Secuencia Negativa	46	BE1-46N	I2 = 6%xIn I2 = 8%xIn K = 10
	Retorno de Energía	Potencia Inversa	32	BE1-32R	20 W Time Dial = 60
	Interrupción Circuito de Excitación	Pérdida de Excitación	40	BE1-40Q	125 VARS t = 0.3 seg.
	Tensión	Balance de Tensión	60	BE1-60	15%xVn
TRANSFORMADOR POTENCIA	Cortocircuito	Diferencial	87T	ALSTOM KBCH120	1.25 A
		Sobrecorriente Fase - Fase	51	ALSTOM - KCGG140	4.5 A Tiempo Inverso
		Sobrecorriente Tierra	51N	ALSTOM - KCGG140	3.0 A
TRANSFORMADOR 3750 KVA	Cortocircuito	Sobrecorriente	51	BE1-51 (50/51 AT1)	6.0 A
		Sobrecorriente Instantánea	50	BE1-50 (50 AT1)	2.0 A Tiempo Definido
		Sobrecorriente en el Neutro		BE1-50/51 B-107 (51N AT1)	1.2 A
TRANSFORMADOR 1000 KVA	Cortocircuito	Sobrecorriente	51	BE1-51 (50/51 AT2)	2.6 A
		Sobrecorriente Instantánea	50	BE1-50 (50 AT2)	0.7 A Tiempo Definido
		Sobrecorriente en el Neutro		BE1-50/51 B-107 (51N AT2)	2.0 A

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 15*Resumen ajustes unidad de generación G2*

UNIDAD TG2					
EQUIPO PROTEGIDO	TIPO DE PROTECCION	FUNCIONES		RELÉ	AJUSTES
	Tipo de perturbación	Protección	ANSI	Modelo	
GENERADOR	Cortocircuito	Diferencial Generador	87G	7UT623	0.1 I/In t = Instantáneo
	Carga asimétrica	Secuencia Negativa	46	7UT613	I ₂ = 5% x I _n I ₂ = 100% x I _n
	Retorno de Energía	Potencia Inversa	32	7UT613	5.02 10 s
	Impedancia	Impedancia	21	7UT623	3.92 A 96 V 4 s
	Tensión	Sobretensión	59	7UT623	144 V 15 s
TRANSFORMADOR POTENCIA	Cortocircuito	Diferencial	87T	7UT613	0.30 I/In 8.0 I/In
		Sobrecorriente Fase - Fase	51	7UT613	8 I/In 0.1 s 1.1 I/In Normal Inverse Dial 0.2
		Sobrecorriente Tierra	51N	7UT613	37.5 A 0.1 s 0.50 A Normal Inverse Dial 0.37
TRANSFORMADOR 7.5 MVA	Diferencial	Diferencial	87	7UT613	0.30 I/In 15.1 I/In
	Cortocircuito	Sobrecorriente	51	7UT613	17.4 A 0.1 s
TRANSFORMADOR EXCITACIÓN	Cortocircuito	Sobrecorriente	51	BE1-51 (50/51 AT2)	B (0.2) Instantáneo B7 Extremely

Fuente: Especificación de fabricante

Tabla 16*Resumen ajustes unidades de generación G3 Y G4*

UNIDAD UTI						
EQUIPO PROTEGIDO	TIPO DE PROTECCION	FUNCIONES		RELÉ	AJUSTES G3	AJUSTES G4
	Tipo de perturbación	Protección	ANSI	Modelo		
GENERADOR	Cortocircuito	Diferencial Generador	87G	1xCFD	0.2 A t = 0.02	0.2 A t = 0.02
		Sobrecorriente con tensión controlada	51V	3xIGCV (T. Inverso)	Time Dial = 4 s Tap= 5 A	Time Dial = 4 s Tap= 5 A
	Sobrecarga	Sobrecarga	49E	1xIRT	Temp = 14 W TMS = 2	Temp = 14 W TMS = 2
	Tensión	Máxima Tensión	59	1xIAV*	120% Vn t = 1s	120% Vn t = 1s
		Mínima Tensión	27	1xIAV*	80% Vn t = 3s	80% Vn t = 3s
	Cortocircuito Tierra Estator (95%)	Falla Tierra Estator	59N	1xIAV	10 V t = 3 seg.	10 V t = 3 seg.
	Excitación	Sobrecorriente Excitatriz	76	1xPJC	25 Adc t = 0 s	25 Adc t = 0 s
	Interrupción Circuito de Excitación	Pérdida de Excitación	40	1xCEH	X'd/2 = 2 Xd = 37.71 W	X'd/2 = 2 Xd = 37.71 W
	Carga Asimétrica	Secuencia Negativa	46	5: 1xSGC G4: 1xINC	I2 = 10% K = 10 Trip 2 = 12x10 s	0.63 x 3 = 1.89 A TMS = 7.5
	Retorno de Energía	Potencia Inversa	32	1xICW	Tap = 25 TMS = 3	Tap = 25 TMS = 3
	Cortocircuito en el Rotor	Falla Tierra Rotor	64R	1xPJG	120 V	120 V
	Potencia	Mínima Potencia	37	1xCFW	I = 0.016 A 0.45 MW	I = 0.016 A 0.45 MW
	Tensión	Barra sin Tensión	27DB	1xHGA	Tensión RST 14 V T. Inverso	Tensión RST 10.39 V T. Inverso
TRANSFORMADOR	Cortocircuito	Diferencial Generador + Transformador	87 G-T	1xDTH	145 mA	145 mA
		Sobrecorriente Fase	51	1xCDG (T. inverso)	Arranque = 0.75xIn TD = 0.1	Arranque = 0.75xIn TD = 0.1
		Sobrecorriente Tierra	51N	2xCDG (T. inverso)	Arranque = 0.3xIn TD = 0.9	Arranque = 0.3xIn TD = 0.9

Fuente: Especificación de fabricante

3.3.3 ESCENARIOS DE OPERACIÓN

En general, cuanto mayor es la corriente de cortocircuito, mayor es la energía incidente del arco eléctrico, sin embargo, dado que la energía del arco eléctrico también depende de la duración del arco, no se puede suponer que la corriente de falla más alta siempre ocasionará el peor escenario. Esto se debe a que, menores valores de cortocircuito pueden generar mayores tiempos de actuación de los dispositivos de protección y, en consecuencia, una mayor duración del arco y la energía incidente.

En este caso se considera el escenario donde las unidades de generación G1, G2, G3 y G4 están en servicio.

Tabla 17

Escenario analizado

ESCENARIO	APORTE DE CORTOCIRCUITO DEL SEIN	GRUPO G1	GRUPO G2	GRUPOS G3 y G4
Escenario 1	Máximo cortocircuito	En servicio	En servicio	En servicio

Fuente: Elaboración propia

Dicho escenario más crítico, en términos de energía incidente generada, es el que determinará la categorización del equipo de protección a utilizar (EPP).

3.3.4 EQUIVALENTE DE THEVENIN DEL SEIN.

Se ha considerado el aporte de cortocircuito del SEIN mediante un equivalente de thevenin en barras de 220 kV de la central Térmica. Para el cálculo del thevenin se utilizó el archivo de simulación DlgSILENT del COES publicado para desarrollar estudios de Operatividad, el cual contiene el modelo de red del SEIN con el despacho de generadores para los escenarios hidrológicos de avenida y estiaje en máxima, media y mínima demanda, asimismo se encuentran las bibliotecas con los parámetros eléctricos de las instalaciones del SEIN.

Los principales parámetros del equivalente thevenin se resumen a continuación:

Tabla 18

Parámetros del equivalente thevenin del SEIN

ESCENARIO	MÁXIMO CORTOCIRCUITO DEL SEIN	MÍNIMO CORTOCIRCUITO DEL SEIN
Potencia de cortocircuito (MVA)	9334.21	8463.34
Corriente de cortocircuito (kA)	24.50	22.21
Relación X/R	11.52	11.40

Fuente: Portal del Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional Recuperado de <http://www.coes.org.pe/Portal/search?k=digsilent> (2019, 25 de agosto).

CAPÍTULO IV: CÁLCULO DE ENERGÍA INCIDENTE

Los algoritmos realizados en esta tesis se basaron en formulas escritas, por lo cual se realizaron los cálculos de energía incidente en una hoja de cálculo Excel (Anexo 5).

4.1 UNIDAD DE GENERACIÓN G1

A) Transformador principal TG1

La Central Térmica, como ya ha sido mencionado anteriormente, cuenta con cuatro unidades generadoras: G1, G2, G3 y G4; cada una de esta cuenta con un transformador principal. Estos transformadores se encargan de transformar la energía generada de 16,5 kV (G1) o 13.8 kV (G2, G3 y G4) en los respectivos generadores, a una tensión de 220 kV para ser enviada al patio de llaves y, posteriormente, ser distribuida.

Derivado del estudio de cortocircuito se obtiene las corrientes de cortocircuito de la Central Térmica como se muestra en la Tabla 13, información brindada por la central para el cálculo de la corriente de arco eléctrico.

Según información recibida por parte de la Central Térmica, la corriente de falla es de 99.5kA. Asimismo, se puede asumir valores similares a los anteriores para la duración del arco eléctrico y la distancia del personal.

- Corriente de arco eléctrico:

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (99.5 \text{ kA}) = 1.96$$

$$I_a = 93.19 \text{ kA}$$

Datos:

- V = 16.5 kV.
- I_{bf} = 99.5 kA.
- T = 0.09 seg.
- D = 910 mm.

- **Energía Incidente:**

La energía incidente, de igual manera, es calculada para sistemas con tensión mayor a 15 kV:

$$E = 2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2.142 \times 10^6 \times 16.5 \text{ kV} \times 99.50 \text{ kA} \times \left(\frac{0.09}{(910 \text{ mm})^2}\right)$$

$$E = 458.6 \frac{J}{cm^2} \quad \text{ó} \quad 91.35 \frac{cal}{cm^2}$$

Límite de protección contra arco eléctrico (AFB)

Dónde:

- DB = Es la distancia de frontera del punto de arqueo (mm).
- EB = Energía incidente en (J/cm²) en el límite de protección = 5.0 J/cal.
- t = Tiempo de arco (segundos).
- V = Tensión del sistema (Kv)
- I_{bf} = Corriente de falla franca (kA).

$$- DB = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{EB}\right)}$$

$$- DB = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times 16.5 \times 99.5 \times \left(\frac{0.09}{5}\right)}$$

$$- DB = 7.95 \text{ m.}$$

B) Grupo electrógeno G1

La Unidad de generación G1 tiene un grupo electrógeno de respaldo, en caso de falla o mantenimiento.

La energía incidente, de igual manera, es calculada para sistemas con tensión mayor a 15 kV:

Datos:

- V = 16.5 kV.
- I_{bf} = 99.5 kA.

- T = 0.09 seg.
- D = 910 mm.

$$E = 2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{D^2}\right)$$

$$E = 2.142 \times 10^6 \times 16.5 \text{ kV} \times 99.50 \text{ kA} \times \left(\frac{0.09}{(910 \text{ mm})^2}\right)$$

$$E = 458.6 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \quad \text{ó} \quad 91.35 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

$$DB = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times V \times I_{bf} \times \left(\frac{t}{EB}\right)}$$

Dónde:

DB = Es la distancia de frontera del punto de arqueo (mm).

EB = Energía incidente en (J/cm²) a una distancia de frontera.

I_{bf} = Corriente de falla franca (kA).

$$DB = \sqrt{2.142 \times 10^6 \times 16.5 \times 99.85 \times \left(\frac{0.09}{5}\right)}$$

DB = 7953.54 mm ó 7.95 m.

C) Transformador de 4.16 kV

- Corriente de arco eléctrico:

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

Dato:

I_{bf} = 17.24 kA

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (17.24 \text{ kA}) = 1.26$$

$$I_a = 16.58 \text{ kA}$$

- **Energía incidente normalizada (En):**

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

Dónde:

- En = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K₁ = -0.792; configuración abierta.
- K₁ = -0.555; configuración en caja.
- K₂ = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- K₂ = -0.113; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K₁ = -0.555
 - Constante K₂ = -0.113
 - Corriente de arco (I_a) = 16.58 kA
 - Espacio entre conductores = 102 mm.
- $$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(16.58)) + 0.0011 \times (102)$$

$$E_n = 5.79 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

E = Energía incidente (J/cm²). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)

- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV

- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 5.79 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1
- Duración del arco (t): 0.086 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 5.79 \times \left(\frac{0.086}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 1.69 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 5.79 \times \frac{0.086}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20} \right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1291 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.29 \text{ m.}$$

D) Motor de arranque

El nivel de voltaje es 4.16 kV para el motor de arranque de 300 HP.

- Corriente de arco eléctrico:

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

Dato:

$$I_{bf} = 17.24 \text{ kA}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_b f$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (17.24 \text{ kA}) = 1.26$$

$$I_a = 16.58 \text{ kA.}$$

- **Energía incidente normalizada (En) :**

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (cal/cm^2) para un tiempo y distancia.

- I_a = Corriente de arco.

- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.

- $K_1 = -0.555$; configuración en caja.

- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.

- $K_2 = -0.113$; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$

- Constante $K_2 = -0.113$

- Corriente de arco (I_a) = 16.58 kA

- Espacio entre conductores = 102 mm.

$$\log E_n = -0.555 (+) -0.113 + 1.081 \times (\log(16.58)) + 0.0011 \times (102)$$

$$E_n = 5.79 \text{ cal}/\text{cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm^2)

- C_f = Factor de Cálculo

= 1.0; tensión > 1kV

= 1.5; tensión < 1kV

- E_n = Energía incidente normalizada

- t = Tiempo de arco (segundos)

- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

Energía normalizada (En): 5.79 cal/cm²

Factor de cálculo (Cf): 1

Duración del arco (t): 0.086 seg.

Distancia de trabajo: 910 mm.

Exponente de distancia (x): 0.973

Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm²

$$E = 1 \times 5.79 \times \left(\frac{0.086}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 1.69 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[5.79 \times \frac{0.086}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1291 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.29 \text{ m.}$$

E) Barra 11BBA 0.48 KV –TG1

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

I_a = corriente del arco eléctrico (kA)

K = -0.153 para configuraciones al aire libre

-0.097 para configuraciones en caja

I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)

V = voltaje del sistema (kV)

G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

$K = -0.097$ para configuraciones en caja

$I_{bf} = 26.49$ kA

$V = 0.48$ kV

$G = 32$ mm.

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log (26.49) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (26.49) - 0.00304 \times 32 \times \log 26.49$$

$$I_a = 14.18 \text{ kA}$$

- **Energía Normalizada**

$$\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.

- I_a = Corriente de arco.

- $K1 = -0.792$; configuración abierta.

= -0.555 ; configuración en caja.

- $K2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.

= -0.113 ; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm)

Datos:

- Constante $K1 = -0.555$

- Constante $K2 = -0.113$

- Corriente de arco (I_a) = 14.18 kA

- Espacio entre conductores = 32 mm.

$$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(14.18)) + 0.0011 \times (32)$$

$$E_n = 4.09 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)

- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): $4.09 cal/cm^2$
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 0.016 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 4.09 \times \left(\frac{0.016}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 0.49 cal/cm^2$$

$$DB = [4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)
- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): $4.09 cal/cm^2$
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 0.016 seg.

- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$- DB = [1.5 \times 4.09 \times \left(\frac{0.086}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)]^{\frac{1}{1.473}}$$

$$- DB = 332.61 \text{ mm. } \text{ó } 0.33 \text{ m.}$$

F) Barra MCC-BOP 0.48 kV TG1

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

I_a = corriente del arco eléctrico (kA)

K = -0.153 para configuraciones al aire libre

-0.097 para configuraciones en caja

I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)

V = voltaje del sistema (kV)

G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- K = -0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = 11.00 kA
- V = 0.48 kV
- G = 32 mm.

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log (11.00) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (11.00) - 0.00304 \times 32 \times \log 11.00$$

$$I_a = 6.82 \text{ kA}$$

- Energía Normalizada

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.
= -0.555 ; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
= -0.113 ; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$
- Constante $K_2 = -0.113$
- Corriente de arco (I_a) = 6.82 kA
- Espacio entre conductores = 32 mm .

$$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(6.82)) + 0.0011 \times (32)$$

$$E_n = 1.86 \text{ cal/cm}^2$$

- Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)

- C_f = Factor de Cálculo
= 1.0; tensión > 1kV
= 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.86 cal/cm^2

- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 0.020 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 1.86 \times \left(\frac{0.02}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 0.28 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = \left[4.184 \times Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando En esta en cal/cm²)
- Cf = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 1.86 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 0.02 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm²

$$- DB = \left[1.5 \times 1.86 \times \left(\frac{0.02}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right) \right]^{\frac{1}{1.473}}$$

- DB = 226.15 mm. ó 0.23 m.

G) Barra Turbina 0.48 kV TG1

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- K = -0.153 para configuraciones al aire libre
-0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

K = -0.097 para configuraciones en caja

I_{bf} = 18.20 kA

V = 0.48 kV

G = 32 mm.

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log (18.20) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (18.20) - 0.00304 \times 32 \times \log 18.20$$

$$I_a = 10.37 \text{ kA}$$

- Energía Normalizada

$$\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.

- I_a = Corriente de arco.

- $K1$ = -0.792; configuración abierta.

- = -0.555; configuración en caja.

- $K2$ = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.

- = -0.113; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555

- Constante K2 = -0.113

- Corriente de arco (Ia) = 10.37 kA

- Espacio entre conductores = 32 mm.

$$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(10.35)) + 0.0011 \times (32)$$

$$E_n = 2.92 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)

- C_f = Factor de Cálculo

= 1.0; tensión > 1kV

= 1.5; tensión < 1kV

- E_n = Energía incidente normalizada

- t = Tiempo de arco (segundos)

- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)

- x = Es el exponente de la distancia. (Ver tabla 5)

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 2.92 cal/cm²

- Factor de cálculo (C_f): 1.5

- Duración del arco (t): 0.020 seg.

- Distancia de trabajo: 610 mm.

- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 2.92 \times \left(\frac{0.02}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 0.43 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = [4.184 \times Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando En esta en cal/cm²)
- Cf = Factor de Cálculo
 - 1.0; tensión > 1kV
 - 1.5; tensión < 1kV
- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 2.92 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 0.02 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$- DB = [1.5 \times 2.92 \times \left(\frac{0.02}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)]^{\frac{1}{1.473}}$$

$$- DB = 307.66 \text{ mm. ó } 0.31 \text{ m.}$$

4.2 UNIDAD DE GENERACIÓN G2

A) Barra de 13,8 kV – TG2

- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (85.20A)$$

$$I_a = 79.73A$$

- **Energía incidente normalizada (En) :**

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G \quad \dots\dots(3)$$

Dónde:

- En = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K₁ = -0.792; configuración abierta.
- = -0.555; configuración en caja.
- K₂ = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- = -0.113; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K₁ = -0.555
- Constante K₂ = 0
- Corriente de arco (I_a) = 16.58 kA
- Espacio entre conductores = 153 mm.

$$\log E_n = -0.555 (+) 1.081 \times (\log(79.73)) + 0.0011 \times (153)$$

$$E_n = 46.66 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)

- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 46.66 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1
- Duración del arco (t): 0.09 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 46.66 \times \left(\frac{0.09}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 14.22 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times Cf \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 46.66 \times \frac{0.09}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1155 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.56 \text{ m.}$$

B) Grupo Electrónico GE_SR001 – TG2

- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

Dato:

- I_{bf}: 85.20 kA

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (85.20 \text{ kA})$$

$$I_a = 79.73 \text{ kA}$$

- **Energía incidente normalizada (E_n):**
- $\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G \quad \dots\dots(3)$
- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.
- $K_1 = -0.555$; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- $K_2 = -0.113$; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$
- Constante $K_2 = 0$
- Corriente de arco (I_a) = 79.73 kA
- Espacio entre conductores = 153 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) 1.081 \times (\log(79.73)) + 0.0011 \times (153)$

$$E_n = 46.66 \text{ cal/cm}^2.$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm^2). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)
- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 46.66 cal/cm^2
- Factor de cálculo (C_f): 1
- Duración del arco (t): 0.09 seg.

- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 46.66 \times \left(\frac{0.09}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 14.22 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 46.66 \times \frac{0.09}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1155 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.56 \text{ m.}$$

C) Barra Media Tensión (4.16 kV) – TG2

- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_b f$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (12.00 \text{ kA})$$

$$I_a = 11.61 \text{ kA}$$

- **Energía incidente normalizada (En):**
- $\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G \quad \dots\dots(3)$
- Dónde:
- En = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K₁ = -0.792; configuración abierta.

- $K_1 = -0.555$; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- $K_3 = -0.113$; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$
 - Constante $K_2 = -0.113$
 - Corriente de arco (I_a) = 11.61 kA
 - Espacio entre conductores = 102 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(11.61)) + 0.0011 \times (102)$

$$E_n = 3.94 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm²)

- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 3.94 cal/cm²

- Factor de cálculo (Cf): 1
- Duración del arco (t): 0.12 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 3.94 \times \left(\frac{0.12}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 1.60 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 3.94 \times \frac{0.12}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1223 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.22 \text{ m.}$$

D) Motor de Arranque (4.16 kV) – TG2

Dato:

- I_{bf} = 12.00 kA.
- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (12.00 \text{ kA})$$

$$I_a = 11.61 \text{ kA}$$

- **Energía incidente normalizada (En):**
- log En = K1 + K2 + 1.081 (log(I_a)) + 0.0011G
- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.
- $K_1 = -0.555$; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- $K_2 = -0.113$; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$
- Constante $K_2 = -0.113$
- Corriente de arco (I_a) = 11.61 kA
- Espacio entre conductores = 102 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log (11.61)) + 0.0011 \times (102)$

$$E_n = 3.94 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm^2). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)
- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 3.94 cal/cm^2
- Factor de cálculo (C_f): 1
- Duración del arco (t): 0.12 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973

- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 3.94 \times \left(\frac{0.12}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 1.60 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 3.94 \times \frac{0.12}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 1223 \text{ mm.}$$

$$DB = 1.22 \text{ m.}$$

E) Centro de Control de Motores Turbina TG2

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)

- $K = -0.153$ para configuraciones al aire libre

-0.097 para configuraciones en caja

- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)

- V = voltaje del sistema (kV)

- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- $K = -0.097$ para configuraciones en caja

- $I_{bf} = 21.30$ kA

- $V = 0.48$ kV

- $G = 32$ mm.

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log (21.30) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (21.30) - 0.00304 \times 32 \times \log 21.30$$

$$I_a = 11.82 \text{ kA}$$

- **Energía Normalizada**

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.

- I_a = Corriente de arco.

- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.

- $K_2 = -0.555$; configuración en caja.

- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.

- $G = -0.113$; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$

- Constante $K_2 = -0.113$

- Corriente de arco (I_a) = 11.82 kA

- Espacio entre conductores = 32 mm.

$$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(11.82)) + 0.0011 \times (32)$$

$$E_n = 3.36 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm^2)

- C_f = Factor de Cálculo

= 1.0; tensión > 1kV

= 1.5; tensión < 1kV

- E_n = Energía incidente normalizada

- t = Tiempo de arco (segundos)

- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)

- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 3.36 cal/cm^2

- Factor de cálculo (C_f): 1.5

- Duración del arco (t): 0.051 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 3.36 \times \left(\frac{0.051}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 1.28 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = \left[4.184 \times Cf \times En \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando En esta en cal/cm²)
- Cf = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 3.36 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 0.02 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$- DB = \left[1.5 \times 3.36 \times \left(\frac{0.02}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)\right]^{\frac{1}{1.473}}$$

$$- DB = 639.48 \text{ mm. ó } 0.64 \text{ m.}$$

F) Paquete eléctrico del Centro de Control de Motores TG2

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- K = -0.153 para configuraciones al aire libre
-0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- K = -0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = 17.20 kA
- V = 0.48 kV
- G = 32 mm.

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log (17.20) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (17.20) - 0.00304 \times 32 \times \log 17.20$$

$$I_a = 9.89 \text{ kA}$$

Energía Normalizada

$$\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J /cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K1 = -0.792; configuración abierta.
= -0.555; configuración en caja.
- K2 = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
= -0.113; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555
- Constante K2 = -0.113
- Corriente de arco (Ia) = 9.89 kA
- Espacio entre conductores = 32 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(9.89)) + 0.0011 \times (32)$

$$E_n = 2.77 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 2.77 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 0.051 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 2.77 \times \left(\frac{0.051}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 1.06 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = [4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm^2) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm^2)
- Cf = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): $2.77 cal/cm^2$
- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 0.051 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): $1.20 cal/cm^2$.

$$- DB = [1.5 \times 2.77 \times \left(\frac{0.051}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)]^{\frac{1}{1.473}}$$

- DB = 561.14 mm. ó 0.56 m.

4.3 UNIDAD GENERADORA Y TRANSFORMADORES G3 Y G4

A) BARRA 13.8 kV G3-G4

- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_b f$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (67.90 kA)$$

$$I_a = 63.78 kA$$

- **Energía incidente normalizada (E_n):**

$$- \log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

Dónde:

- En = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- Ia = Corriente de arco.
- K1 = -0.792; configuración abierta.
= -0.555; configuración en caja.
- K2 = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
= -0.113; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555
- Constante K2 = 0
- Corriente de arco (Ia) = 63.78 kA
- Espacio entre conductores = 153 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) 1.081 \times (\log(63.78)) + 0.0011 \times (153)$

$$E_n = 36.66 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²). (Se omite el factor 4.184 cuando En esta en cal/cm²)
- Cf = Factor de Cálculo
= 1.0; tensión > 1kV
= 1.5; tensión < 1kV
- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 36.66 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1
- Duración del arco (t): 0.086 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.

- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 36.66 \times \left(\frac{0.0086}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 10.68 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = \left[1 \times 36.66 \times \frac{0.086}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}\right]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 8607 \text{ mm.}$$

$$DB = 8.61 \text{ m.}$$

B) Grupo Electrónico GE_SR003 – TG3

- **Corriente de arco eléctrico:**

El presente caso utiliza también la fórmula para sistemas con tensiones mayores a 1 kV:

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log I_b f$$

$$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \times \log (67.9 \text{ kA})$$

$$I_a = 63.78 \text{ kA}$$

- **Energía incidente normalizada (En) :**

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G \quad \dots\dots(3)$$

- Dónde:

- En = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K₁ = -0.792; configuración abierta.
= -0.555; configuración en caja.
- K₂ = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
= -0.113; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555
- Constante K2 = 0
- Corriente de arco (Ia) = 63.78 kA
- Espacio entre conductores = 153 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) 1.081 \times (\log(63.78)) + 0.0011 \times (153)$

$$E_n = 36.66 \text{ cal/cm}^2.$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²). (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 36.66 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1
- Duración del arco (t): 0.09 seg.
- Distancia de trabajo: 910 mm.
- Exponente de distancia (x): 0.973
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$E = 1 \times 36.66 \times \left(\frac{0.09}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0.973}}{910^{0.973}}\right).$$

$$E = 11.17 \text{ cal/cm}^2.$$

$$DB = [4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$DB = [1 \times 36.66 \times \frac{0.09}{0.2} \times \frac{610^{0.973}}{1.20}]^{\frac{1}{0.973}}$$

$$DB = 9018 \text{ mm.}$$

$$DB = 9.01 \text{ m.}$$

C) Barra del Centro de Control de Motores TG3

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- $K = -0.153$ para configuraciones al aire libre
 -0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- $K = -0.097$ para configuraciones en caja
- $I_{bf} = 8 \text{ kA}$
- $V = 0.48 \text{ kV}$
- $G = 32 \text{ mm.}$

$$\log I_a = -0.097 + 0.662 \times \log (8) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (8) - 0.00304 \times 32 \times \log 8$$

$$I_a = 5.23 \text{ kA}$$

Energía Normalizada

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:
- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.

- I_a = Corriente de arco.
- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.
- $K_1 = -0.555$; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
- $K_2 = -0.113$; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante $K_1 = -0.555$
- Constante $K_2 = -0.113$
- Corriente de arco (I_a) = 9.89 kA
- Espacio entre conductores = 32 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(5.23)) + 0.0011 \times (32)$

$$E_n = 1.39 \text{ cal/cm}^2$$

- **Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB) :**

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n esta en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.39 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5

- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 1.39 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 20.89 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.39 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².
- DB = $\left[1.5 \times 1.39 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)\right]^{\frac{1}{1.473}}$
- DB = 4242 mm. ó 4.24 m.

D) Barra del Centro de Control de Motores TG3

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

Donde:

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- $K = -0.153$ para configuraciones al aire libre
 -0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- $K = -0.097$ para configuraciones en caja
- $I_{bf} = 8$ kA
- $V = 0.48$ kV
- $G = 32$ mm.

$$\log I_a = -0.097 + 0.662 \times \log (8) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (8) - 0.00304 \times 32 \times \log 8$$

$$I_a = 5.23 \text{ kA}$$

Energía Normalizada

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

- Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm^2) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- $K_1 = -0.792$; configuración abierta.
 $= -0.555$; configuración en caja.
- $K_2 = 0$; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
 $= -0.113$; sistemas aterrizados.

- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555
 - Constante K2 = -0.113
 - Corriente de arco (Ia) = 5.23 kA
 - Espacio entre conductores = 32 mm.
- $$\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(5.23)) + 0.0011 \times (32)$$

$$E_n = 1.39 \text{ cal/cm}^2$$

- Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.39 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 1.39 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 20.89 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f = Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1kV
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.39 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$- DB = \left[1.5 \times 1.39 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right) \right]^{\frac{1}{1.473}}$$

$$- DB = 4242 \text{ mm. ó } 4.24 \text{ m.}$$

E) Barra del Centro de Control de Motores G4

- Corriente de arco

$$\log I_a = K + 0.662 \times \log I_{bf} + 0.0966 \times V + 0.000526 \times G + 0.5588 \times V \times \log I_{bf} - 0.00304 \times G \times \log I_{bf}$$

- I_a = corriente del arco eléctrico (kA)
- K = -0.153 para configuraciones al aire libre
-0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = corriente de falla franca trifásica (kA)
- V = voltaje del sistema (kV)
- G = gap (espacio) entre conductores (mm).

Datos:

- K = -0.097 para configuraciones en caja
- I_{bf} = 7.8 kA
- V = 0.48 kV
- G = 32 mm.

$$\log I_a = -0.097 + 0.662 \times \log (7.8) + 0.0966 \times (0.48) + 0.000526 \times (32) + 0.5588 \times 0.48 \times \log (7.8) - 0.00304 \times 32 \times \log (7.8)$$

$$I_a = 5.12 \text{ kA}$$

Energía Normalizada

$$\log E_n = K1 + K2 + 1.081 (\log(I_a)) + 0.0011G$$

Dónde:

- E_n = Energía incidente normalizada (J/cm²) para un tiempo y distancia.
- I_a = Corriente de arco.
- K1 = -0.792; configuración abierta.
= -0.555; configuración en caja.
- K2 = 0; Sistemas no aterrizados y con una alta resistencia a tierra.
= -0.113; sistemas aterrizados.
- G = Distancia entre conductores. (mm).

Datos:

- Constante K1 = -0.555
- Constante K2 = -0.113
- Corriente de arco (Ia) = 5.12 kA
- Espacio entre conductores = 32 mm.
- $\log E_n = -0.555 (+) -0.133 + 1.081 \times (\log(5.12)) + 0.0011 \times (32)$
- $E_n = 1.36 \text{ cal/cm}^2$

- Energía incidente (E) y Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right).$$

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando E_n está en cal/cm²)
- C_f: Factor de Cálculo
- = 1.0; tensión > 1kV
- = 1.5; tensión < 1Kv
- E_n = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (E_n): 1.36 cal/cm²
- Factor de cálculo (C_f): 1.5
- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473

$$E = 1.5 \times 1.36 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{610^{1.473}}\right).$$

$$E = 20.41 \text{ cal/cm}^2$$

$$DB = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{EB}\right)\right]^{\frac{1}{x}}$$

Donde:

- E = Energía incidente (J/cm²) (Se omite el factor 4.184 cuando En esta en cal/cm²)
- Cf = Factor de Cálculo
 - = 1.0; tensión > 1kV
 - = 1.5; tensión < 1kV
- En = Energía incidente normalizada
- t = Tiempo de arco (segundos)
- D = Distancia posible del origen del arco a una persona (mm)
- x = Es el exponente de la distancia.

Datos:

- Energía normalizada (En): 1.36 cal/cm²
- Factor de cálculo (Cf): 1.5
- Duración del arco (t): 2 seg.
- Distancia de trabajo: 610 mm.
- Exponente de distancia (x): 1.473
- Energía incidente Límite de Protección (EB): 1.20 cal/cm².

$$- DB = [1.5 \times 1.36 \times \left(\frac{2}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1.473}}{1.20}\right)]^{\frac{1}{1.473}}$$

- DB = 4177 mm. ó 4.17 m.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RESULTADOS EN UNIDADES DE GENERACIÓN G1,G2,G3 Y G4

Tabla 19

Tabla de resultados en generador G2

EQUIPO	TIPO	NIVEL DE VOLTAJE	DISTANCIA DE TRABAJO	CORRIENTE DE ARCO	ARC FLASH BOUNDARY	ENERGIA INCIDENTE	TIEMPO DE DESPEJE DE FALLA	NFPA 70E EPP REQUERIDO
		kV	cm	kA	m	cal/cm ²	segundos	
BARRA DE_13,8 kV – TG2	Barra	13.8	91	79.63	11.56	14.17	0.090	Nivel 3
GE_SR001 – TG2	Interruptor	13.8	91	79.63	11.56	14.17	0.090	Nivel 3
	Cables	13.8	91	79.63	11.56	14.17	0.090	Nivel 3
Barra Transformador Arranque	Barra	13.8	91	79.63	11.56	14.17	0.090	Nivel 3
Barra Transformador SSAA	Barra	13.8	91	79.63	11.56	14.17	0.090	Nivel 3
BARRA Media Tension TG2	Barra	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
Transformador OSMONIC	Interruptor	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
	Cables	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
Bomba combustible	Interruptor	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
	Cables	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
Motor de arranque	Interruptor	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
	Cables	4.16	91	11.61	1.22	1.59	0.120	Nivel 1
Barra de Transferencia	Barra	0.48	61	11.81	0.64	1.29	0.051	Nivel 1
MCC Turbina	Interruptor	0.48	61	11.81	0.64	1.29	0.051	Nivel 1
	Cables	0.48	61	11.81	0.64	1.29	0.051	Nivel 1
Sala SSAA	Interruptor	0.48	61	11.81	0.24	0.30	0.012	Nivel 1
	Cables	0.48	61	11.81	0.24	0.30	0.012	Nivel 1
Paquete Electrico MCC Turbina	Barra	0.48	61	9.92	0.56	1.07	0.051	Nivel 1
Sala SSAA TG2	Barra	0.48	61	4.40	0.31	0.44	0.051	Nivel 1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20*Tabla de resultados en generador G1*

EQUIPO	TIPO	NIVEL DE VOLTAJE	DISTANCIA DE TRABAJO	CORRIENTE DE ARCO	ARC FLASH BOUNDARY	ENERGIA INCIDENTE	TIEMPO DE DESPEJE DE FALLA	NFPA 70E EPP REQUERIDO
		kV	cm	kA	m	cal/cm2	segundos	
BARRA 11BAA_16.5 kV - TG1	Barra	16.5	91	100.43	7.99	91.35	0.090	> Nivel 4
GE_SR001 – TG1	Interruptor	16.5	91	100.43	7.99	91.35	0.090	> Nivel 4
	Cables	16.5	91	100.43	7.99	91.35	0.090	> Nivel 4
Transformador 11BBT01	Barra	16.5	91	100.43	7.99	91.35	0.090	> Nivel 4
BARRA 11BEE_4.16KV – TG1	Barra	4.16	91	16.58	1.29	1.68	0.086	Nivel 1
Transformador 11BFT01	Interruptor	4.16	91	16.58	1.29	1.68	0.086	Nivel 1
	Cables	4.16	91	16.58	1.29	1.68	0.086	Nivel 1
Motor 11MBJ01	Interruptor	4.16	91	16.58	1.29	1.68	0.086	Nivel 1
	Cables	4.16	91	16.58	1.29	1.68	0.086	Nivel 1
BARRA 11BBA 0.48KV – TG1	Barra	0.48	61	14.18	0.33	0.49	0.016	Nivel 1
Salida hacia Sala BOP 11UBA92	Interruptor	0.48	61	14.18	0.33	0.49	0.016	Nivel 1
	Cables	0.48	61	14.18	0.33	0.49	0.016	Nivel 1
Salida hacia Sala Paquete Eléctrico 11UBA01	Interruptor	0.48	61	14.18	0.33	0.49	0.016	Nivel 1
	Cables	0.48	61	14.18	0.33	0.49	0.016	Nivel 1
BARRA MCC-BOP 0.48KV TG1	Barra	0.48	61	6.83	0.23	0.28	0.020	Nivel 1
BARRA Turbina 0.48KV TG1	Barra	0.48	61	10.35	0.31	0.44	0.020	Nivel 1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21*Tabla de resultados en generadores G3 y G4*

EQUIPO	TIPO	NIVEL DE VOLTAJE	DISTANCIA DE TRABAJO	CORRIENTE DE ARCO	ARC FLASH BOUNDARY	ENERGIA INCIDENTE	TIEMPO DE DESPEJE DE FALLA	NFPA 70E EPP REQUERIDO
		kV	cm	kA	m	cal/cm2	segundos	
Barra TG3 13.8KV	Barra	13.8	91	63.76	8.60	10.63	0.086	Nivel 3
GE_SR003 – TG3	Interruptor	13.8	91	63.76	9.01	11.12	0.090	Nivel 3
	Cables	13.8	91	63.76	9.01	11.12	0.090	Nivel 3
Transformador SSAA TG3	Cables	13.8	91	63.76	8.60	10.63	0.086	Nivel 3
Barra TG4 13.8KV	Barra	13.8	91	63.76	8.60	10.63	0.086	Nivel 3
GE_SR003 – TG4	Interruptor	13.8	91	63.76	9.01	11.12	0.090	Nivel 3
	Cables	13.8	91	63.76	9.01	11.12	0.090	Nivel 3
Transformador SSAA TG4	Cables	13.8	91	63.76	8.60	10.63	0.086	Nivel 3
Barra MCC Turbina TG3	Barra	0.48	61	5.10	4.16	20.35	2.000	Nivel 3
Barra MCC Turbina TG4	Barra	0.48	61	5.24	4.25	20.95	2.000	Nivel 3

Fuente: Elaboración propia

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- En los compartimentos de fuerza de la TG1 16,5 kV (11BAA_16.5 kV), se tiene niveles de energía incidente mayores a 40 cal/cm², lo cual no permite realizar trabajos con circuitos energizados, debido a que la energía incidente es de 91.35 cal/cm², este valor excede los límites de protección permitidos y no se garantiza la seguridad de la operación.
- La norma NFPA 70E no considera una categoría de riesgo mayor a 40 cal/cm², debido a que sobre ese nivel son más significativos los peligros debido a ondas de sonido y presión, que por los efectos térmicos.
- En los compartimentos de fuerza de la sala de media tensión TG1 (11BEE 4.16 kV) y de la sala de transferencia (11UBA92 0.48 kV), se tienen niveles de energía incidente menores o iguales a 1.68 cal/cm² (Categoría de EPP 1) y 0.49 cal/cm² (Categoría de EPP 1), respectivamente. Para operar en este nivel de energía incidente de arco es necesario que se garantice el cumplimiento de la filosofía de disparos de los relés de protección y se utilice el equipo EPP correspondiente.
- En los compartimentos de fuerza de la TG2 13,8 kV (11BAA_13.8 kV), se tiene niveles de energía incidente menores a 14.17 cal/cm², lo cual no permite realizar trabajos con circuitos energizados (Categoría de EPP 3). Salvo que se cumpla con procedimientos adecuados de trabajo y se cuente con el equipo EPP correspondiente.
- En los compartimentos de fuerza de la sala de media tensión (4.16 kV) y de servicios auxiliares (0.48 kV), se tienen niveles de energía incidente menores o iguales a 1.59 cal/cm² (Categoría de EPP 1) y 1.07 cal/cm² (Categoría de EPP 1), respectivamente. Para operar en este nivel de energía incidente de arco, es necesario que se garantice el cumplimiento de la filosofía de disparos de los relés de protección y se utilice el equipo EPP correspondiente.

- En los compartimentos de fuerza de la TG3 / TG4 (13.8 kV), sala de control y mando (0,48 kV), se tiene niveles de energía incidente menores a 10.63 cal/cm² y 20.95 cal/cm², respectivamente, lo cual no permite realizar trabajos con circuitos energizados (Categoría de EPP 3). Salvo que se cumpla con procedimientos adecuados de trabajo y se cuente con el equipo EPP correspondiente. Asimismo, para operar en este nivel de energía incidente de arco es necesario que se garantice el cumplimiento de la filosofía de disparos del breaker de baja tensión.

- En los compartimentos de fuerza de la sala de media tensión TG1 (4.16 kV y 16.5 kV) se tiene distancias de seguridad para arco eléctrico varían entre 1.29 m a 7.99 m; mientras que en la sala de baja tensión (0.48 kV) comprende valores entre 0.23 m a 0.33 m.

- En los compartimentos de fuerza de la sala de media tensión TG2 (4.16 kV y 13.8 kV) se tiene distancias de seguridad para arco eléctrico varían entre 1.22 m a 11.56 m.; mientras que en la sala de baja tensión (0.48 kV) comprende valores entre 0.24 m a 0.64 m.

- En los compartimentos de fuerza de la sala de media tensión TG3 y TG4 (13.8 kV) se tiene distancias de seguridad para arco eléctrico varían entre 8.16 m a 9.01 m.; mientras que en la sala de baja tensión (0.48 kV) comprende valores entre 4.16 m a 4.25 m.

CONCLUSIONES

- Los cálculos de energía incidente aplicando la normativa NFPA 70E-2015 y el estándar IEEE1584-2002, permitió establecer las condiciones de seguridad respecto al límite de protección contra arco eléctrico y categoría de Equipo de Protección Personal necesario para salvaguardar la integridad de los trabajadores que intervienen equipos energizados.
- Los cálculos de energía incidente varían desde 0.28 cal/cm² (nivel 1) en baja tensión, hasta 91.35 cal/cm² (superior al nivel 4) en media tensión en condiciones donde se evalúa el peor escenario cuando operan las cuatro turbinas en simultáneo.
- Se deben respetar estrictamente las distancias límite de protección contra arco eléctrico que varían entre 0.23 m en baja tensión hasta 11.56 m en media tensión, para los casos donde no se use Equipo de Protección Personal.
- Existen trabajos en equipos energizados en los cuales no resulta suficiente utilizar el máximo nivel de Equipo de Protección Personal (Nivel 4), debido a que la energía incidente calculada es mayor a 40 cal/cm². Por lo mencionado los trabajos que se ejecuten en estas instalaciones deben realizarse cuando los equipos se encuentren desenergizados completamente y con puesta a tierra visible.
- Para los casos donde se trabaja con equipos energizados y la energía incidente sea mayor a 40 cal/cm² se debe implementar relés de protección contra arco eléctrico que detecte y extinga el arco en el menor tiempo posible, para reducir la energía incidente.
- La información sobre los cálculos realizados para una simulación de falla por arco eléctrico se presenta en etiquetas de arco eléctrico, donde los equipos muestren información sobre la distancia límite de protección contra arco eléctrico, energía incidente y la categoría de equipo de protección personal.

RECOMENDACIONES

- Señalizar el límite de protección de arco eléctrico y estandarizar una sola categoría de EPP contra relámpago de arco para cada lugar de trabajo, ya que en emergencias o por condiciones del trabajador pueda ser que no proceda a colocarse el EPP adecuado y termine utilizando una categoría menor en una zona de mayor riesgo.
- Realizar un estudio de Corriente de Cortocircuito, Coordinación de Protecciones y Relámpago de Arco, en caso de reajuste en las protecciones, se incremente la potencia de los transformadores, cuando exista variaciones considerables en el SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) por ingreso de nuevas Centrales o cargas importantes
- Trabajar en la medida de lo posible con equipos desenergizados, caso contrario, es necesaria que se garantice el la función de disparos de los relés de protección, se utilice el equipo EPP correspondiente y se respeten los límites de protección descritos en las etiquetas de arco; además utilizar equipos portátiles de desconexión remota cuando se interviene equipos energizados, de modo que estos equipos permitan desconectar un interruptor que no abrió, desde una distancia segura para el trabajador.
- Implementar procedimientos de trabajo seguro para riesgo de arco eléctrico en base a la información presentada en las etiquetas de arco eléctrico, como parte de un programa de seguridad eléctrica de la Central Térmica.
- Realizar la simulación de falla periódicamente, a intervalos que excedan lo 5 años, para tener en cuenta los sistemas de transmisión o distribución, que podrían afectar los valores calculados.
- Validar los resultados de arco eléctrico tomando en cuenta la actualización de los estándares NFPA70E e IEEE1584.

BIBLIOGRAFÍA

- ETAP, 1986. *Electrical Power System Analysis Software*, Irvine California, USA. 2014 Edition.
- Hernández Sampieri, R. et al. *Metodología de la Investigación*. 2ª. ed. McGraw-Hill. México, D.F., 2001.
- IEEE 1584 Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Guide for performing arc-flash hazard calculation*. IEEE-USA, 2002.
- MINEM (2002). Ministerio de Energía Minas R.M. N° 091-2002-MEM, *Terminología en electricidad*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/>.
- NFPA 70E National Fire Protection Association. *Estándar for Electrical Safety in the workplace*, 2015 Edition.
- OSINERGMIN (2014). Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. *Supervisión de contratos de Centrales e Generación y líneas de transmisión*. Recuperado de <https://www.osinergmin.gob.pe>.

ANEXOS

Anexo 1 - Etiqueta de arco eléctrico




 ADVERTENCIA				
	Presencia de Arco Eléctrico y Descarga Eléctrica (Obligatorio usar EPP adecuado)		Nivel 1 	
	Limite de protección contra relámpago de arco eléctrico	1.29 m		
	Energía Incidente	1.68 cal/cm²		EPP Requerido con un EBT mayor a la Energía incidente
	Distancia de trabajo	91.4 cm		
	Frontera de aproximación limitada	1.52 m		
	Frontera de aproximación restringido	0.66 m		Uso de guante Clase: 1
	Protección contra choque eléctrico	4160 VAC		V-clasif: 7500 VAC
	Riesgo de shock eléctrico cuando:	Se quitan las cubiertas		
Dispositivo de protección:	Celda: BARRA 11BEE_4.16KV-TG1			

Figura 5. Etiqueta de Arco eléctrico, Fuente: Software ETAP.

Anexo 2 - Unidad de Generación TG1 y TG2

Figura 6. Barra 4,16 kV TG1, Fuente: Central Térmica



Figura 7. Barra 4,16 kV TG2, Fuente: Central Térmica

Anexo 3 - Diagrama Unifilar de la Central Térmica

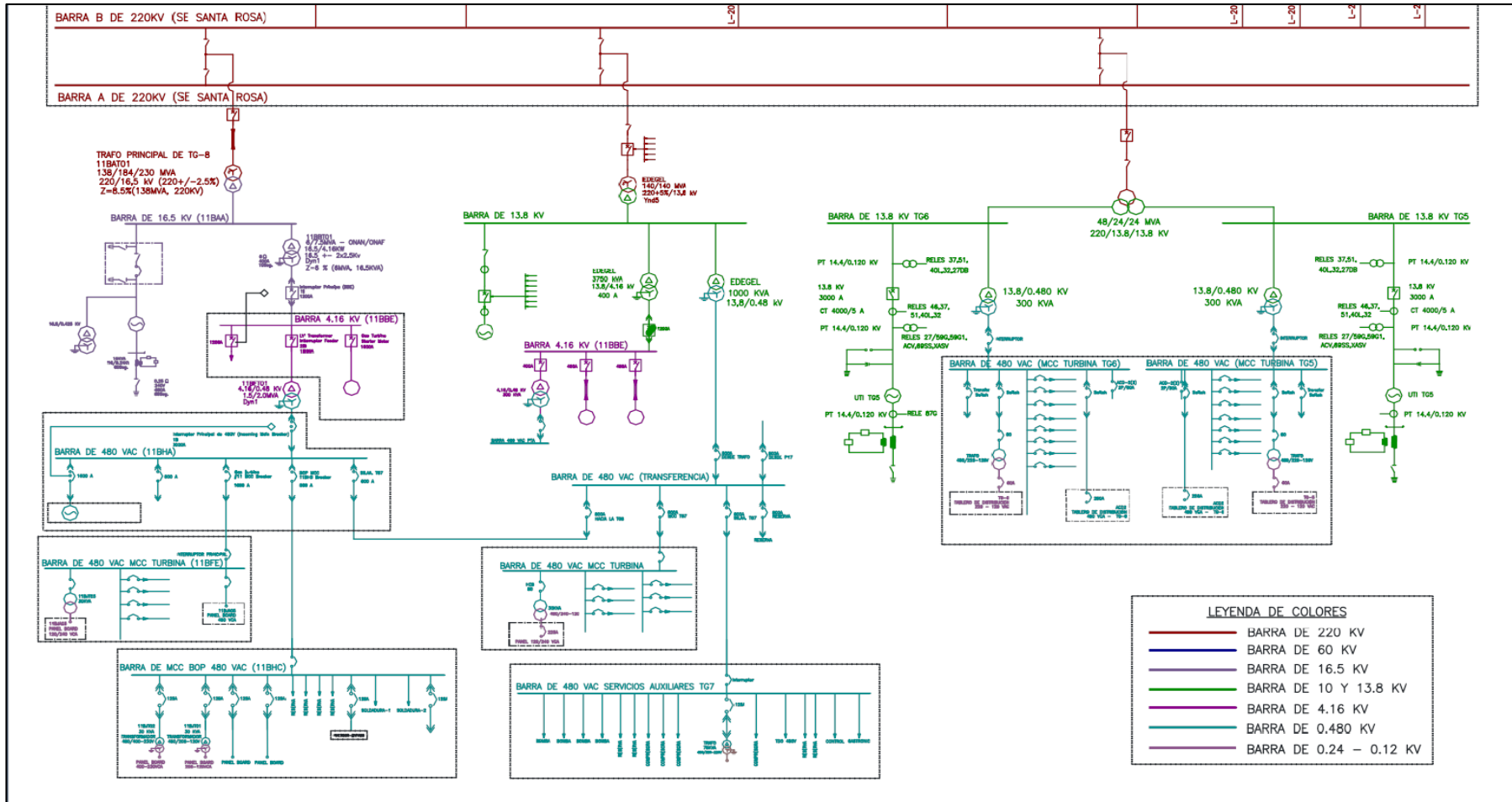


Figura 8. Diagrama Unifilar Central Térmica, Fuente: Especificación de la Central Térmica.

Anexo 4 - Resultados del Software ETAP en TG1 (Continúa)

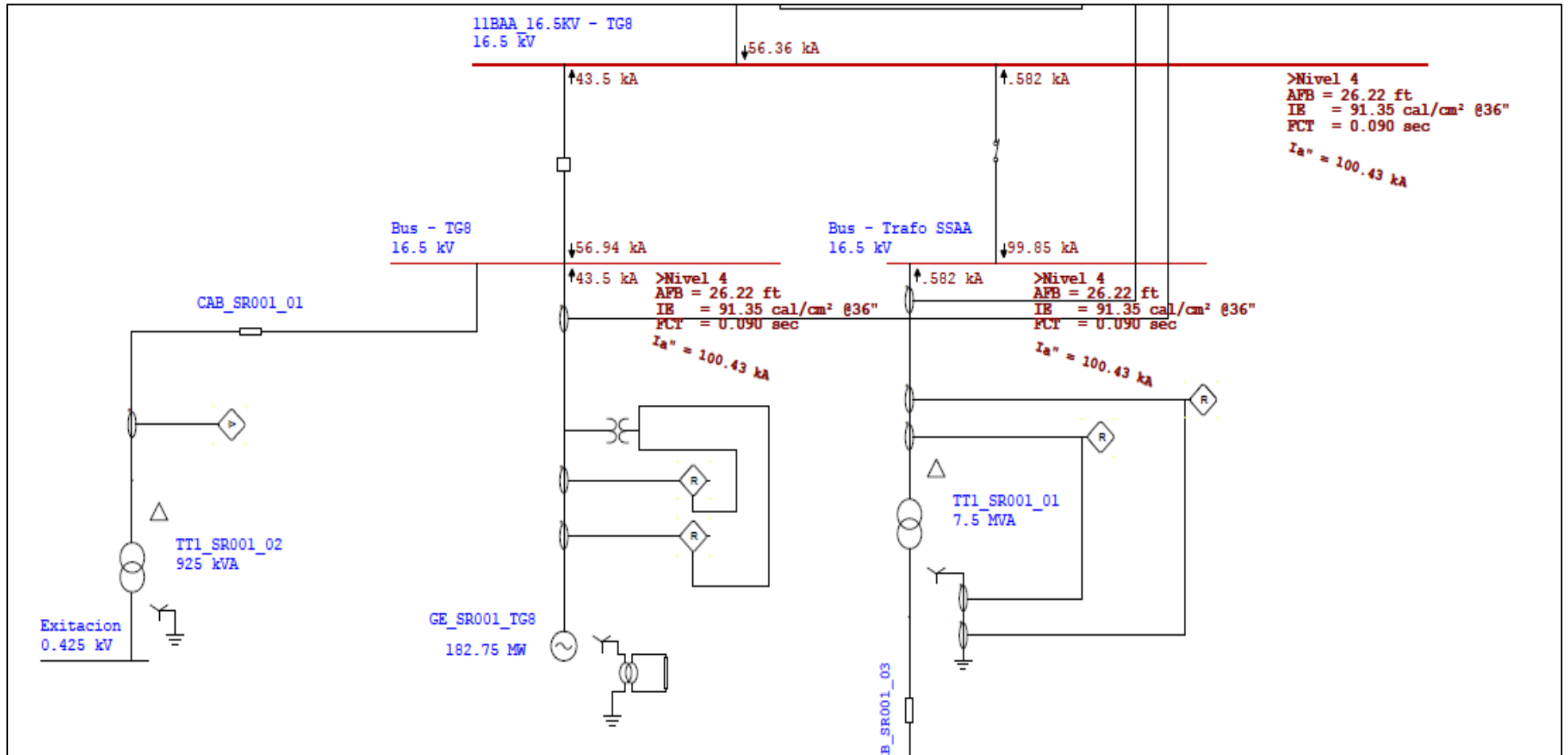


Figura 9. Resultados del estudio de arco eléctrico, Fuente: Software ETAP.

Anexo 4 - Resultados del Software ETAP en TG1 (Continuación)

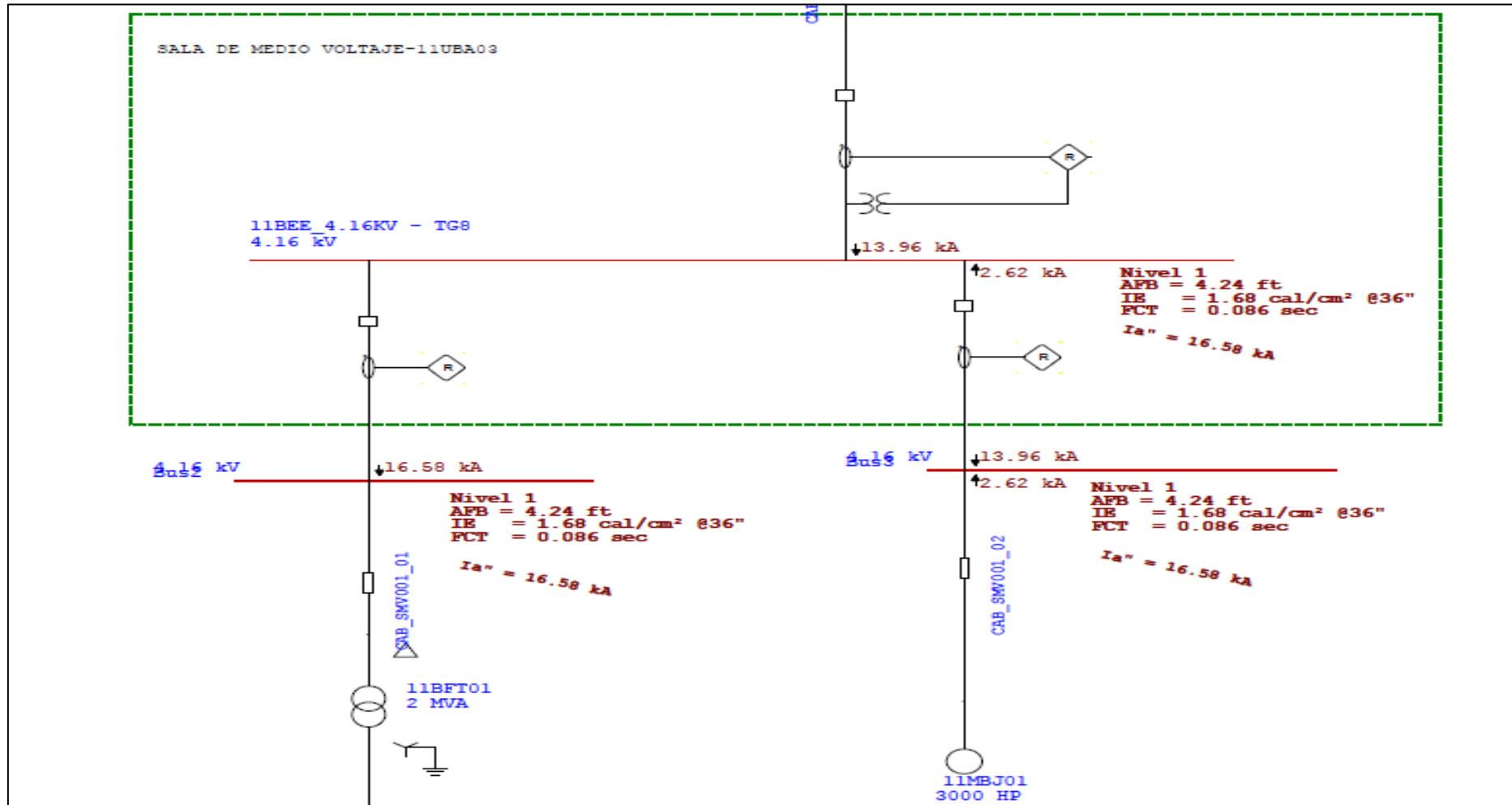


Figura 9. Resultados del estudio de arco eléctrico, Fuente: Software ETAP.

Anexo 5 - Cálculos de energía incidente en hoja de cálculo Excel (Continúa)

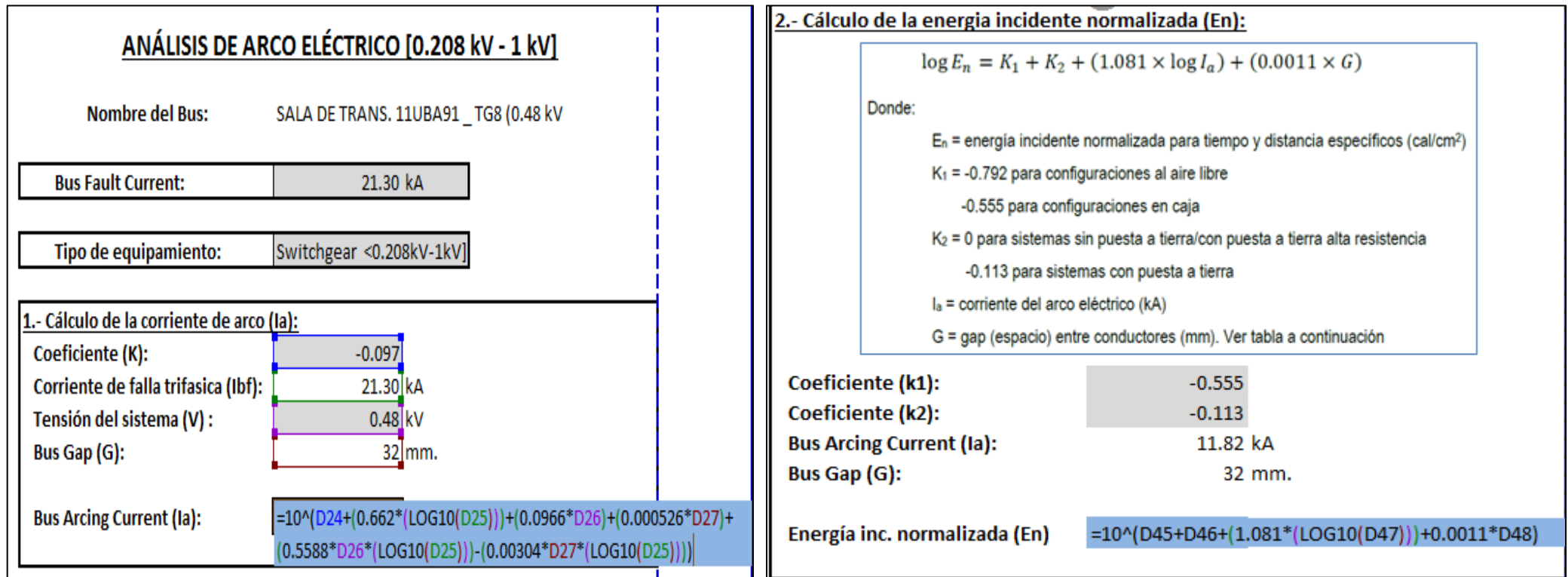


Figura 10. Cálculo de energía incidente, Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 5 - Cálculos de energía incidente en hoja de cálculo Excel (Continuación)

3.- Cálculo del límite de protección para arco eléctrico

$$D_B = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{1/x}$$

E_B = energía incidente en el límite de protección (J/cm²)

Energía inc. normalizada (En):	3.36 cal/cm ²
Factor de cálculo (Cf):	1.5
Duración del arco (t):	0.016 seg.
Clase de equipo:	Switchgear 5 kV
Distancia de trabajo (D):	910 mm.
Exponente de distancia (x):	1.473
Energía inc. Lim. De prot. (E _B) :	1.20 cal/cm ²
Energía incidente (E) :	0.22 cal/cm ²
Categoría de protección :	CATEGORIA 1
Límite de protección contra arco eléctrico (AFB):	$= (D73 * D72 * (D74 / 0.2) * ((610^{D77}) / (D78)))^{(1 / D77)}$ 11.46 pulg (in) 0.96 pies (ft)

3.- Cálculo de la energía incidente (E) y AFB:

$$E = 4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

Dónde:

- E: Energía incidente (J/cm²) – para expresarlo en Cal/cm² se debe omitir el número 4,184 de la fórmula anterior.
- En: Energía incidente normalizada (Cal/cm²)
- Cf: Factor de cálculo:
1,0 ; voltaje > 1 kV
1,5 ; voltaje < 1 kV
- t: Duración del arco (seg.)
- D: Distancia a la fuente de arco (mm.)
- x: Exponente de distancia

Energía inc. normalizada (En):	3.36 cal/cm ²
Factor de cálculo (Cf):	1.5
Duración del arco (t):	0.016 seg.
Clase de equipo:	Switchgear 5 kV
Distancia de trabajo (D):	910 mm.
Exponente de distancia (x):	1.473
Energía inc. Lim. De prot. (E _B) :	1.20 cal/cm ²
Energía incidente (E) :	$= D73 * D72 * (D74 / 0.2) * ((610^{D77}) / (D76^{D77}))$
Categoría de protección :	CATEGORIA 1

Figura 10. Cálculo de energía incidente, Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 6 - Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>¿Aplicando la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE 1584 se podrá determinar las condiciones de seguridad para intervenir equipos energizados ante una falla por arco eléctrico?</p> <p>- ¿Cuál será la categoría de Equipo de Protección Personal adecuada para intervenir equipos energizados ante riesgo por arco eléctrico?</p> <p>- ¿Cuál será la distancia límite de protección de arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado para una persona que se encuentre expuesta, sin ninguna clase de protección?</p>	<p>- Determinar las condiciones de seguridad adecuadas para el trabajador que interviene equipos energizados simulando una falla por arco eléctrico usando los cálculos de la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE1584.</p> <p>- Seleccionar la categoría de Equipo de Protección Personal a utilizar en trabajos con equipos energizados de acuerdo al riesgo por arco eléctrico que permita salvaguardar la integridad de los trabajadores, aplicando la Normativa NFPA 70E.</p> <p>- Determinar la distancia límite de protección ante un arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado, aplicando el estándar IEEE1584.</p>	<p>- Aplicando la normativa NFPA 70E y el estándar IEEE1584 se determina las condiciones de seguridad necesarias para intervenir equipos energizados ante una falla de arco eléctrico en las subestaciones eléctricas de la Central Térmica en estudio.</p> <p>- Aplicando la Normativa NFPA 70E se define la categoría de Equipo de Protección Personal de acuerdo al riesgo por arco eléctrico permitiendo salvaguardar la integridad de los trabajadores que intervienen equipos energizados.</p> <p>- Aplicando el estándar IEEE 1584 se determina el límite de protección de arco eléctrico en donde se produzca una quemadura curable de segundo grado, para una persona que se encuentre expuesta sin ninguna clase de protección.</p>	<p>Variables independientes: Aplicación de Norma NFPA 70E-2015 y estándar IEEE-1584 (2002).</p> <p>Indicador: -Corriente de arco - Tiempo de arco eléctrico - Voltaje</p> <p>Variables dependientes:</p> <p>-Categoría de Equipo de protección personal adecuado</p> <p>- Distancia límite de protección de arco eléctrico</p> <p>Indicador: - Energía Incidente</p>	<p>-Enfoque cuantitativo, nivel de estudio causa-efecto, y diseño no experimental.</p>