

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Facultad Regional Delta

Proyecto Final



**Análisis y Evaluación de Riesgo de
Arco Eléctrico**

Cerisola, Gustavo

Venaglia, Yamil

Profesor: Ing. Sergio, Vena

2021

Un día seguro, seguro que es un gran día.

28 de abril - Día Mundial de la Seguridad y Salud en el Trabajo.

A nuestras familias.

AGRADECIMIENTOS

*A nuestras familias
por su apoyo incondicional
a lo largo de todos estos años
de estudio.*

*Al ingeniero Sergio Vena
por su acompañamiento
y ayuda a lo largo de
este proyecto.*

*A la Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Delta
y a todos los docentes que nos transmitieron
incontables conocimientos a lo largo de estos años,
permitiéndonos crear la base de este trabajo.*

RESUMEN

Este proyecto consistió en el análisis de los fenómenos ocurridos durante un arco eléctrico originado por una falla de cortocircuito en una instalación eléctrica, en particular, la determinación de la energía térmica que se disipa en el arco eléctrico, con el objetivo esencial de garantizar la seguridad y protección de las personas. Además, se fundamentó la importancia de su prevención y la recolección de estadísticas respecto a accidentes laborales de esta índole, realizada por organismos de reconocimiento mundial.

Para el estudio y evaluación de este fenómeno se tomaron como referencia las recomendaciones de normas internacionales existentes específicas en el área.

Se realizó el análisis de los elementos de protección personal (EPP) que los operarios deben utilizar y las medidas de seguridad que se requieren adoptar al momento de ejecutar los distintos trabajos en la instalación.

Adicionalmente, se abordaron detalles de funcionamiento sobre algunas posibles mejoras tecnológicas que todavía no tienen extendida aplicación, donde su incorporación adicional podría reducir aún más los efectos adversos provocados por un incipiente arco eléctrico en una instalación.

SUMMARY

The project that is presented below consisted in the analysis of the phenomena that happens during an electric arc caused by a short-circuit failure in an electrical installation, particularly, the determination of the thermal energy that is dissipated in the electric arc, with the imperative aim to guarantee people's safety and protection. It approached the importance of electric arc prevention and collection of statistics concerning occupational accidents of this nature, carried out by world-renowned organizations.

For the study and evaluation of this phenomenon, the recommendations of specific existing international standards in the area were taken as a reference.

The analysis of the personal protection elements (PPE) that the operators must use and the safety measures that are required to be adopted at the moment of executing the different works in the installation were carried out.

Also, operational details were added about some possible technological improvements that are not yet widely applied, where their additional incorporation could further reduce the adverse effects caused by an incipient electric arc in an installation.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	15
1.1. Contexto Histórico	15
1.2. Organismos.....	15
1.2.1. Administración de Seguridad y Salud Ocupacional	16
1.2.2. Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica	16
1.2.3. Comisión Electrotécnica Internacional	16
1.2.4. Asociación Nacional de Protección contra el Fuego.....	17
1.2.5. Asociación Americana para Pruebas y Materiales.....	17
1.2.6. Instituto Argentino de Normalización y Certificación	17
1.3. Documentos	17
1.3.1. NFPA 70	17
1.3.2. NFPA 70E	18
1.3.3. NFPA 70B	19
1.3.4. IEEE 1584.....	20
1.4. Métodos Matemáticos de Cálculo	20
1.4.1. NFPA 70E	21
1.4.2. IEEE 1584.....	23
1.5. Seguridad Eléctrica.....	27
1.6. Corriente de Cortocircuito.....	28
1.7. Fallas en Tableros de Baja Tensión	28
1.8. Coordinación y Selectividad de Protecciones	29
1.9. Choque Eléctrico	29
1.10. Arco Eléctrico.....	30
1.11. Energía Incidente	32
1.12. Elementos de Protección Personal	33
1.12.1. Categorías de Elementos de Protección Personal	33
1.12.2. Ensayos.....	35
1.12.3. Categorías de los Tejidos y Materiales	37
1.13. Efectos Fisiológicos de la Corriente Eléctrica.....	38
1.14. Estadísticas de Seguridad Eléctrica	38
1.15. Distancias de Seguridad	41

1.16. Modelo de Etiqueta	43
CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO	45
2.1. Descripción de la Práctica	45
2.2. Desarrollo Práctico	46
2.2.1. Cargas y Transformador.....	47
2.2.2. Corrientes Nominales	47
2.2.3. Análisis del Cortocircuito	48
2.2.4. Coordinación y Selectividad de Protecciones.....	49
2.2.5. Evaluación de Riesgos de Arco Eléctrico	59
2.2.6. Cálculos y Etiquetas.....	62
2.2.7. Elementos de Protección Personal	67
2.3. CONCLUSIONES	69
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE BENEFICIOS.....	71
3.1. Análisis del Riesgo	71
CAPÍTULO 4: POSIBLES MEJORAS.....	73
4.1. Disminución de la Energía	73
4.1.1. Interruptores de Baja Tensión para Mantenimiento	74
4.1.2. Protección con Detectores de Arco Eléctrico	75
4.1.3. Interruptores de Puesta a Tierra Ultra Rápidos en Media Tensión.....	78
4.1.4. Tableros de Baja Tensión Resistentes a Arcos Internos	80
4.2. Aumento de la Distancia	82
4.2.1. Sistemas Remoto de Inserción y Extracción de Interruptores.....	83
4.2.2. Interruptores con Operación Remota	84
PROPUESTA A FUTUROS DESAFÍOS.....	86
ANEXOS.....	87
Anexo 1 – Ensayo de Elementos de Protección Personal.....	88
Anexo 2-A – Esquema Unifilar Simplificado	89
Anexo 2-B – Esquema Unifilar Tablero General de Baja Tensión	90
Anexo 2-C – Esquema Unifilar de Cargas y Transformador	91
Anexo 2-D – Esquema Unifilar con Corrientes Nominales	92
Anexo 2-E – Esquema Unifilar con Corrientes de Cortocircuito	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se aborda y describe el contexto histórico, los principales organismos y documentos, como así también métodos de cálculo y los principales conceptos abordados en el proyecto.

1.1. Contexto Histórico

Durante el siglo XX la evolución de la industria se desencadenó de forma rápida y vertiginosa como consecuencia de los avances tecnológicos que se desarrollaron en este período. En los comienzos, el objetivo principal estaba centrado en la producción en serie a gran escala de productos y servicios de todo tipo y clase, buscando únicamente la mayor rentabilidad y maximización de las ganancias económicas.

Este paradigma, encabezado por grandes grupos empresarios, se fue transformando junto con el correr del tiempo, surgiendo nuevas preocupaciones e intereses a considerar por los ingenieros de todo el mundo. Entre los principales nuevos objetivos se destacaron la conciencia por el medio ambiente, la optimización de la materia prima o proceso industrial a llevar a cabo y la seguridad laboral de los empleados. Cabe mencionar además que la consideración de este cambio de enfoque se vio reflejado en el incremento de ganancias económicas por parte de las industrias, ya no como se pensaba en un principio por ingreso directo, sino por ingresos indirectos o reducción de pérdidas económicas al optimizar recursos y procesos.

El tema principal abordado en el presente proyecto, se incluye dentro de una de las problemáticas que se mencionaron anteriormente, la seguridad laboral. Más precisamente, la prevención de posibles accidentes eléctricos relacionados con descargas directas y quemaduras por la formación del arco eléctrico en tableros de baja tensión (BT), también denominado "Arc Flash".

1.2. Organismos

Los cambios en las necesidades de las industrias que se fueron dando durante el siglo XX trajeron aparejados el surgimiento de distintos organismos creados con el objeto de regular y controlar los nuevos aspectos de interés, como por ejemplo la seguridad laboral y la aplicación de documentos con el objetivo de minimizar el riesgo de los trabajadores.

1.2.1. Administración de Seguridad y Salud Ocupacional

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) es una agencia del Departamento de Trabajo de los Estados Unidos. El congreso norteamericano estableció la agencia bajo la Ley de la Seguridad y Salud Ocupacional, firmada por el presidente Richard M. Nixon en 1970. La misión de OSHA es asegurar condiciones de trabajo seguras y saludables para los trabajadores mediante el establecimiento y aplicación de normas, y mediante la capacitación, divulgación, educación y asistencia. La agencia también se encarga de hacer cumplir diversas leyes y reglamentos.

En conjunto, las normas de OSHA exigen que los empleadores mantengan condiciones y adopten prácticas que son razonablemente necesarias y apropiadas para proteger a los trabajadores en sus tareas laborales, se familiaricen y cumplan con las normas que aplican a sus establecimientos, y se aseguren que sus empleados tengan y utilicen los EPP cuando lo requiera la seguridad para preservar su salud.

La OSHA emite normas ante una gran variedad de peligros en el lugar de trabajo, incluyendo: sustancias tóxicas, agentes físicos dañinos, peligros eléctricos, riesgos de caídas, riesgos de excavaciones, desechos peligrosos, enfermedades infecciosas, peligros de incendios y explosiones, atmósferas peligrosas, máquinas peligrosas y espacios restringidos.

1.2.2. Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la normalización y el desarrollo en áreas técnicas. Con cerca de 425.000 miembros y voluntarios en 160 países, siendo la mayor asociación internacional sin fines de lucro, formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros electricistas, ingenieros electrónicos, ingenieros de sistemas, entre otros.

1.2.3. Comisión Electrotécnica Internacional

La Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC) es una organización mundial sin fines de lucro que agrupa a 173 países y coordina el trabajo de 20.000 expertos en todo el mundo. Las normas internacionales IEC y el trabajo de evaluación de la conformidad sustentan el comercio internacional de productos eléctricos y electrónicos. Ésta facilita el acceso a la electricidad y verifica la seguridad, el rendimiento y la interoperabilidad de los dispositivos y sistemas eléctricos y electrónicos, incluidos, por ejemplo, dispositivos de consumo como teléfonos celulares o

heladeras, equipos médicos y de oficina, tecnología de la información, generación de electricidad y mucho más.

La misión de la organización es promover entre sus miembros la cooperación internacional en todas las áreas de la normalización electrotécnica.

1.2.4. Asociación Nacional de Protección contra el Fuego

La Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (National Fire Protection Association, NFPA) es una organización fundada en Estados Unidos en 1896, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendios, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendios, utilizados tanto por bomberos, como por el personal encargado de la seguridad. Sus estándares conocidos como Códigos Nacionales del Fuego (National Fire Codes) recomiendan las prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios.

1.2.5. Asociación Americana para Pruebas y Materiales

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM) es una organización internacional que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

1.2.6. Instituto Argentino de Normalización y Certificación

El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (originalmente Instituto de Racionalización Argentino de Materiales, IRAM) es un organismo público encargado de la normalización y certificación en Argentina, así como también de la capacitación y elaboración de documentos.

1.3. Documentos

1.3.1. NFPA 70

El NFPA 70, Código Eléctrico Nacional (National Electrical Code, NEC), es un código de alcance internacional. Dicho documento establece lineamientos para la seguridad de instalaciones eléctricas y se alinea a normas internacionales relacionadas con la protección y seguridad en lo que respecta a la corriente eléctrica.

El código tiene por objetivo salvaguardar a las personas y los bienes materiales. Es por esto que plantea recomendaciones necesarias que dan lugar a una instalación eléctrica libre de riesgos.

En términos generales, este documento se aplica en los siguientes ámbitos:

- Instalaciones de conductores y equipos eléctricos en inmuebles públicos y privados. Incluye otras estructuras como patios, parques de atracciones y estacionamientos.
- Instalaciones de conductores y equipos que necesitan de fuentes de suministro eléctrico.
- Instalaciones de otros conductores y equipos exteriores de la propiedad.
- Instalaciones de cables y canalizaciones de fibra óptica.
- Instalaciones en edificaciones utilizadas por las empresas de energía eléctrica. Esto incluye oficinas, almacenes y talleres que no formen parte sustancial de una planta generadora, una subestación o un centro de control.

1.3.2. NFPA 70E

La NFPA 70E, Norma para la Seguridad Eléctrica en el Lugar de Trabajo (Standard for Electrical Safety in the Workplace), proporciona requisitos que ayudan al empleador a cumplir con las exigencias de la OSHA y garantizar la seguridad del empleado. Forma parte del conjunto de normas preparadas por el Comité sobre los Requisitos de Seguridad Eléctrica para los Lugares de Trabajo de los Empleados (Committee on Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces), el cual asiste a la OSHA en la preparación de normas de seguridad.

La finalidad de la norma NFPA 70E, es crear un ambiente de trabajo libre de riesgos eléctricos y su objetivo es siempre desenergizar, esto es, trabajar con la condición de riesgo cero o de seguridad ideal. En los casos en donde no sea posible trabajar en forma desenergizada hay que evaluar el riesgo por choque eléctrico, es decir, con que voltaje se trabaja y como el operario se aísla de este para protegerse, como así también, evaluar el riesgo por arco eléctrico, estableciendo la cantidad de energía incidente que va a generarse en dicho arco y que va a ser proyectada sobre el operario y el resto de la instalación, para culminar con la determinación de las distancias seguras y los EPP adecuados a utilizar por los operarios en dicha instalación.

Hablar de condición de riesgo cero o de seguridad ideal en la actividad laboral no es referirse a que todos los riesgos o peligros, con carácter genéricos, pueden eliminarse, mantenerse todos bajo control o ser corregidos, sino que se refiere a la tendencia a evitar las ocurrencias, por la eliminación o puesta bajo control de las causas desencadenantes, en la búsqueda de alcanzar y mantener el número de accidentes en cero.

La norma NFPA 70E provee las herramientas para que en caso que ocurriese el fenómeno del arco eléctrico, este pueda ser mitigado y las quemaduras sobre el operario no superen las de segundo grado.

Contenido

La norma NFPA 70E actualmente está conformada por la introducción y 3 capítulos. En el capítulo 1 se tratan las prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad, en el capítulo 2 se detallan los requisitos de seguridad relacionados con el mantenimiento y en el capítulo 3 se desarrollan los requisitos de seguridad para equipos especiales, en donde se puede ver distintas situaciones particulares como celdas electrolíticas, cuartos de baterías, equipos electrónicos de potencia, entre otras. En los anexos informativos se pueden encontrar textos que, si bien son importantes para considerar, son de carácter informativo y no obligatorios.

Requisitos Claves

De acuerdo con esta norma, la NFPA 70E, los requisitos claves para obtener seguridad eléctrica son:

- Un programa de seguridad eléctrica.
- Entrenamiento del personal, requisito imprescindible.
- Calificación del personal, si no existiese una norma para tal, la propia empresa podría realizar uno para determinar cómo calificar al personal.
- Condición eléctrica segura, siempre desenergizando cuando sea posible.
- Planear el trabajo y evaluar los riesgos.
- Uso efectivo del EPP, como cuidarlo, conservarlo, limpiarlo y evaluar que esté en condiciones óptimas para sus usos.

Actualización

La norma NFPA 70E es revisada cada 3 años, es decir, que cada trienio sale una norma actualizada.

1.3.3. NFPA 70B

La NFPA 70B, Práctica Recomendada para el Mantenimiento de Equipos Eléctricos (Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance), tiene como propósito proporcionar guías para crear un programa efectivo de mantenimiento eléctrico preventivo (MEP). Ésta aborda el mantenimiento de equipos y debería usarse en conjunto con NFPA 70 y NFPA 70E para ayudar a proporcionar sistemas eléctricos más seguros.

La NFPA 70B detalla en que consiste un programa MEP, porque es necesario, y como desarrollar un programa que implementa medidas de seguridad y métodos de mantenimiento viables. El objetivo de implementar un programa MEP es ayudar a aumentar la seguridad en lugares de trabajo; mantener o, en algunos casos, extender la vida del equipo; y ayudar a prevenir pérdidas en producción

que, a su vez, resultan en pérdida de ingresos. Entre los principales temas abarcados por la misma se pueden encontrar:

- Planificación y desarrollo de un programa de mantenimiento eléctrico de prevención.
- Seguridad personal.
- Principios fundamentales del mantenimiento de los equipos eléctricos.
- Estudios del sistema.
- Calidad de la energía.
- Prueba y métodos de prueba.
- Mantenimiento de los equipos eléctricos sujetos a largos intervalos entre cortes de energía.
- Protección con falla a tierra.
- Puesta a tierra.

1.3.4. IEEE 1584

La IEEE 1584, Guía para el Cálculo de los Riesgos derivados del Arco Eléctrico (IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations), funciona como guía para realizar los cálculos de riesgo de arco eléctrico, presentando modelos matemáticos para que los diseñadores y operadores de instalaciones los apliquen al determinar la distancia de peligro de arco eléctrico y la energía incidente a la que los trabajadores podrían estar expuestos durante su trabajo en o cerca de equipos eléctricos.

Las ecuaciones de esta guía son más complejas en comparación con otros documentos, debido a que utilizan más variables de la instalación en evaluación, pero sus resultados son más precisos.

1.4. Métodos Matemáticos de Cálculo

En 1982, Ralph H. Lee realizó la publicación de un documento que cambió la idea que hasta ese entonces se tenía sobre el origen de las quemaduras eléctricas, la cual consideraba que eran únicamente producidas por el efecto Joule del paso de la corriente en un cuerpo. En su publicación, propone al arco eléctrico como otra fuente posible de quemaduras y desarrolla un modelo teórico basado en el cálculo de la energía incidente producida por un arco eléctrico, que permite estimar las distancias seguras a la fuente de éste.

El modelo de Lee sirvió por varios años y fue la base de los documentos utilizados actualmente, NFPA 70E e IEEE 1584, para realizar los cálculos de energía incidente por un arco eléctrico y determinar el límite de protección contra arco.

Dado que la NFPA 70E y la IEEE 1584 utilizan métodos diferentes, deben considerarse características distintas del sistema a evaluar. Calcular

adecuadamente la energía incidente es fundamental, ya que este cálculo provee información para determinar los EPP adecuados a utilizar por los operarios.

Los cálculos que establecen los documentos NFPA 70E e IEEE 1584 pueden realizarse en forma de:

- **Cálculos Manuales**

Aplicable a pequeños sistemas radiales de distribución. Ambos documentos presentan ecuaciones para ser utilizadas en este caso. Pueden introducirse errores en los cálculos.

- **Hoja de Cálculo**

La IEEE 1584 contiene una hoja de cálculo en Excel para hacer la evaluación de arco eléctrico, mientras que para la NFPA 70E podrían realizarse hojas de cálculo similares con las correspondientes ecuaciones. Esta herramienta es útil únicamente para sistemas radiales de una única fuente y los errores se incrementan con las dimensiones del sistema.

- **Programas Informáticos**

Aplicable a sistemas con varias fuentes y escenarios de interconexiones donde se desea una mayor precisión y en donde los sistemas cambian con el tiempo. Esta herramienta permite reducir errores en los cálculos y agiliza los mismos.

1.4.1. NFPA 70E

En 1995, la edición de la NFPA 70E incluyó al arco eléctrico como riesgo eléctrico, exigiendo a las empresas calcular la energía incidente y límite de protección contra arco en base a los estudios realizados por Lee.

El método de Lee estaba limitado, ya que no permitía determinar el mayor efecto térmico del arco al ser generado en equipos encapsulados, por lo que en las ediciones posteriores de la NFPA 70E se fueron enriqueciendo los cálculos con aportes empíricos de nuevos autores, como Doughy, Neal y Floyd, en los cuales se presentaban nuevas ecuaciones para calcular la energía incidente y el límite de protección contra arco dependiendo si el arco es al aire libre o encapsulado.

Los resultados obtenidos por este método son conservadores, estableciendo una mayor energía incidente que los calculados por el método de la IEEE 1584.

Cálculo de la energía incidente

a) Arco abierto al aire libre ($V \leq 0,6$ kV; 16 kA $\leq I_{cc} \leq 50$ kA)

$$E_{MA} = 5.217 \cdot D_A^{-1,9593} \cdot t_A \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938]$$

Ecuación 1.

Donde:

$$E_{MA} : \text{energía incidente del arco abierto} \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$D_A : \text{distancia a la fuente del arco [pulgadas]}$$

(para distancias mayores o iguales a 18 pulgadas)

$$t_A : \text{duración del arco [s]}$$

$$I_{bf} : \text{corriente de cortocircuito de falla de contacto [kA]}$$

b) Arco en caja ($V \leq 0,6$ kV; 16 kA $\leq I_{cc} \leq 50$ kA)

Caja de 20 pulgadas de cada lado, abierta en un extremo.

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D_B^{-1,4738} \cdot t_A \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675]$$

Ecuación 2.

Donde:

$$E_{MB} : \text{energía incidente del arco en caja} \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$D_B : \text{distancia a la fuente del arco [pulgadas]}$$

(para distancias mayores o iguales a 18 pulgadas)

$$t_A : \text{duración del arco [s]}$$

$$I_{bf} : \text{corriente de cortocircuito de falla de contacto [kA]}$$

c) Arco al aire libre ($V > 0,6$ kV)

$$E = \frac{793 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t_A}{D^2}$$

Ecuación 3.

Donde:

$$E : \text{energía incidente} \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V : \text{tensión nominal del sistema (fase a fase) [kV]}$$

$$I_{bf} : \text{corriente de cortocircuito de falla de contacto [kA]}$$

$$t_A : \text{duración del arco [s]}$$

$$D : \text{distancia a la fuente del arco [pulgadas]}$$

Cálculo del límite de protección contra arco

La potencia máxima teórica en MW es la mitad de MVA de cortocircuito trifásico. Esto ocurre cuando la corriente de arco es 70,7 % de la corriente de cortocircuito

(Icc). Basado en esto, el límite de protección contra arco es calculado con la ecuación 4:

$$D_C = \sqrt{2,65 \cdot 1,732 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t_A}$$

Ecuación 4.

Donde:

D_C : distancia desde la persona a la fuente del arco
donde está expuesto a 1,2 cal/cm² [pies]
 V : tensión nominal del sistema (fase a fase) [kV]
 I_{bf} : corriente de cortocircuito de falla de contacto [kA]
 t_A : duración del arco [s]

1.4.2. IEEE 1584

La IEEE al observar que las ecuaciones elaboradas por Lee no tenían en cuenta algunos parámetros que permitían disminuir la energía incidente, elaboró la IEEE 1584 en base a nuevos modelos empíricos de análisis estadísticos.

Las ecuaciones que fueron derivadas de un modelo de pruebas empíricas son válidas o aplicables entre ciertos límites o parámetros, que pueden describirse mediante la tabla presente en la figura 1.

Parámetro	Rango Aplicable
Voltaje del Sistema	0,208 a 15 kV
Frecuencia	50 a 60 Hz
Corriente de Cortocircuito	0,7 a 106 kA
Separación entre Electrodo	13 a 152 mm
Tipo de Equipo	Aire libre, caja, CCM, panel, tableros, cables
Tipo de Conexión a Tierra	No aterrizado, aterrizado, aterrizado con gran resistencia
Fases	Fallas Trifásicas

Figura 1. Rangos aplicables del método IEEE 1584.

La IEEE 1584 intenta ser más realista que conservadora, y pretende evitar accidentes debido a las limitaciones de la sobreprotección a los trabajadores, ya que la misma puede restringir la visibilidad y movilidad, generando incomodidad y reducción de la productividad del trabajador.

El procedimiento general en la evaluación de arco eléctrico recomendado en la IEEE 1584 consta de los siguientes pasos de cálculo:

1. Recopilar los datos de la instalación.
2. Identificar los posibles modos de operación del sistema. Es importante determinar la corriente de falla en cada barra.
3. Calcular la corriente de falla de contacto en cada punto del sistema.
4. Determinar el tipo de equipo o instalación.
5. Determinar la distancia entre conductores. Estas distancias están tabuladas en la guía.
6. Determinar las distancias de trabajo basadas en el voltaje del sistema y tipo de equipo o instalación. Estas distancias están tabuladas en la guía.
7. Calcular la corriente de falla por arco que fluye a través de cada rama de cada punto de falla. La corriente de falla por arco será menor que la corriente de falla de contacto debido a la impedancia del arco, especialmente en aplicaciones menores a 1000 V.

Cálculo de la corriente de arco para tensiones menores a 1000 V:

$$I_a = 10^{[K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,588 V \log(I_{bf}) - 0,00304 G \log(I_{bf})]}$$

Ecuación 5.

Donde:

I_a : corriente de arco [kA]

K : vale " - 0,153" en configuración abierta

o " - 0,097" en configuración en caja

I_{bf} : corriente de falla de cortocircuito trifásico simétrico [kA]

V : tensión nominal [kV]

G : separación entre conductores [mm]

Cálculo de la corriente de arco para tensiones iguales o mayores a 1000 V:

$$I_a = 10^{[0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})]}$$

Ecuación 6.

Donde:

I_a : corriente de arco [kA]

I_{bf} : corriente de falla de cortocircuito trifásico simétrico [kA]

La ecuación 6 no hace distinción entre la configuración abierta o de caja.

8. Determinar el tiempo requerido para liberar la corriente de falla. Para esto será necesario desarrollar un estudio de coordinación de protecciones y conocer las características de las protecciones de la instalación.
9. Calcular la energía incidente para cada punto de falla. La energía incidente normalizada es utilizada para obtener la energía incidente a una superficie normal a una distancia y tiempo de arco dados con la siguiente ecuación:

$$E_n = 10^{[K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011 G]}$$

Ecuación 7.

Donde:

E_n : energía incidente normalizada en tiempo y distancia $\left[\frac{J}{cm^2} \right]$

I_a : corriente de arco [kA]

K_1 : vale " - 0,792" en configuración abierta

o " - 0,555" en configuración cerrada

K_2 : vale "0" para sistemas sin conexión de puesta a tierra
o aterrizados a traves de alta resistencia

o " - 0,113" para sistemas con conexión a puesta a tierra

G : separación entre conductores [mm]

Finalmente, la energía incidente será:

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

Ecuación 8.

Donde:

E : energía incidente $\left[\frac{J}{cm^2} \right]$

E_n : energía incidente normalizada en tiempo y distancia $\left[\frac{J}{cm^2}\right]$

C_f : factor de cálculo (1 para $V > 15 \text{ kV}$ y $1,5 \leq V \leq 15 \text{ kV}$)

t : duración del arco [s]

D : distancia de trabajo [mm]

X : factor de distancia (tabulado en la guía)

Para los casos en los que el voltaje es superior a 15 kV o la distancia entre los conductores está fuera del rango del modelo, se debe calcular la energía incidente con la siguiente ecuación derivada del método teórico de Lee:

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

Ecuación 9.

Donde:

E : energía incidente $\left[\frac{J}{cm^2}\right]$

V : tensión del sistema [kV]

I_{bf} : corriente de falla de contacto [kA]

t : duración del arco [s]

D : distancia de trabajo [mm]

Para voltajes superiores a 15 kV, la corriente de falla del arco se considera igual a la corriente de falla de contacto.

10. Calcular el límite de protección contra arco para cada punto de falla. El límite de protección contra arco es la distancia mínima a la cual una persona sin EPP puede recibir como máximo una quemadura de segundo grado.

Límite de protección por medio del modelo empírico de la IEEE 1584

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

Ecuación 10.

Límite de protección por medio del método de Lee

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

Ecuación 11.

Donde para las ecuaciones 10 y 11:

D_B : distancia donde se ubica el límite de protección [mm]

C_f : factor de calculo (1 para $> 1 \text{ kV}$ y $1,5 \leq 1 \text{ kV}$)

E_n : energía incidente normalizada en tiempo y distancia $\left[\frac{J}{\text{cm}^2}\right]$

t : duración del arco [s]

X : factor de distancia (tabulado en la guía)

E_B : energía incidente a la distancia de la frontera $\left[\frac{J}{\text{cm}^2}\right]$

(puede ser establecida a $5 \frac{J}{\text{cm}^2}$ o $1,2 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$ para piel descubierta)

I_{bf} : corriente de falla de contacto [kA]

1.5. Seguridad Eléctrica

La seguridad eléctrica es el reconocimiento de los peligros asociados con el uso de la energía eléctrica y la toma de precauciones para que los peligros no causen heridas o muerte.

Ésta es importante porque proporciona, en lo referido a la salud de los trabajadores, un ambiente de trabajo seguro, previene accidentes y reduce la exposición a peligros, como así también, previene o reduce daños a la salud. Por otra parte, cumple con regulaciones, por lo que proporciona una ventaja económica evitando infracciones y reduciendo costos no deseados, principalmente por los tiempos perdidos en la búsqueda de un reemplazo para realizar las tareas hasta la recuperación del trabajador afectado.

Las 3 causas principales de los accidentes eléctricos son:

1. Los equipos incorrectamente instalados e inadecuadamente mantenidos. Se recomienda tener los manuales actualizados para verificar las instalaciones y los mantenimientos de los equipos.
2. Los ambientes de trabajo inseguros. Se debe verificar que los equipos seleccionados sean indicados para el ambiente de trabajo en donde deban emplearse, por ejemplo: ambientes húmedos, con polvos, con fibras, con áreas clasificadas, etc.

3. Los trabajadores no calificados, sin capacitación y/o sin procedimientos y/o sin permisos de trabajos.

1.6. Corriente de Cortocircuito

Una falla de cortocircuito es consecuencia de un contacto inesperado entre conductores, o cualquier pieza conductora unida a tierra. Su estudio resulta importante en toda instalación, ya que es una de las posibles fallas más dañinas en las mismas. Este puede ser originado por distintas fallas como lo son: falla monofásica a tierra, falla bifásica, falla bifásica con contacto a tierra, falla trifásica y falla trifásica a tierra. Normalmente, las fallas las podremos clasificar en simétricas y asimétricas. Las fallas simétricas, se producen cuando se genera un cortocircuito entre todas las fases, si bien es el tipo de falla más grave que involucra la corriente de mayor magnitud, ocurre muy raramente. Es por este motivo que los análisis de cortocircuitos se realizan considerando fallas simétricas. Las fallas asimétricas involucran en cambio, una o dos fases, ocurriendo entre línea y tierra, o entre líneas por lo general.

Es fundamental para su análisis y estudio, la determinación de esta corriente de cortocircuito (I_{cc}), pudiéndose conocer esta magnitud mediante el empleo de programas informáticos o métodos analíticos manuales de cálculo.

A partir de conocer las posibles corrientes de cortocircuitos en los distintos nodos y de distintos criterios que emplea cada profesional, se elige y configura las protecciones más adecuadas para las características que posea la instalación analizada.

Las consecuencias de un posible cortocircuito son muy variables, dependen de la naturaleza que los origina y de la duración de la falla, la ubicación del mismo y la corriente de cortocircuito en cuestión.

1.7. Fallas en Tableros de Baja Tensión

En los tableros de BT existen dos tipos de fallas que llevan asociadas corrientes importantes, la falla de contacto conocida como "bolted fault" y la falla de arco conocida como "arc fault". La falla de contacto es en la que dos o más elementos conductores que están a diferente potencial entran en contacto, dando lugar a cortocircuitos fase-fase o fase-tierra, donde los efectos más dañinos son principalmente de tipo electrodinámico, proporcional a I^2 . En cambio, la falla de arco se manifiesta al disminuir la rigidez dieléctrica del medio aislante, entre dos o más elementos conductores a diferente potencial. En esta falla, los daños son por tipo térmico, proporcional a $R_a I^2$, como consecuencia del elevado valor adquirido por la resistencia de arco R_a , lo que ocasiona una circulación en un aislante altamente ionizado, produciendo abruptos gradientes térmicos causados por el rápido e intenso aumento de la temperatura del aislante, gradientes de

presión en forma de onda de presión y elevada ionización del aislante con la consecuente reducción de su rigidez dieléctrica.

Las causas técnicas de una falla de arco principalmente pueden ser debido a la falla del aislamiento, mientras que las no técnicas más frecuentes pueden ser errores humanos, puestas en servicio no precisas, mantenimiento deficiente y condiciones del entorno, como roedores dentro de los tableros, polución, entre otras.

1.8. Coordinación y Selectividad de Protecciones

Los elementos de protección son dispositivos fundamentales en toda instalación eléctrica, estos serán capaces de salvaguardar la integridad del total de los equipos ante sobrecorrientes de cualquier naturaleza, las cuales podrán ser por sobrecarga o cortocircuito. La protección para estos tipos de fallas podrá estar integrada en un solo dispositivo o separadas en dos elementos de protección diferentes.

La selectividad es la coordinación de las características del disparo de dos o más dispositivos de protección de sobrecorriente, de forma que cuando circula una corriente mayor a la nominal actúan los dispositivos destinados a operar en dicho rango mientras los demás no lo hacen. En resumen, la selectividad de protecciones eléctricas es la acción escalonada de todos los dispositivos, desde la carga hacia la fuente.

El estudio de coordinación es el paso previo a la evaluación de arco eléctrico, donde se determinan los tiempos de apertura de los diferentes equipos de maniobra y protección. El tiempo de apertura de un dispositivo ante una falla es un factor decisivo e influye directamente en el valor de la energía incidente.

1.9. Choque Eléctrico

El choque eléctrico es el riesgo asociado al paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo, a causa de contacto o aproximación a conductores o partes energizadas. El contacto del operario con el elemento energizado produce que este se vea afectado por una circulación de una corriente a través de su cuerpo, la cual ingresa por una parte de éste y sale por otra que se encuentra en contacto con tierra. Las corrientes con magnitudes inferiores a 6 mA le permiten al operario soltarse. A partir de los 10 mA ya no le es posible soltarse del elemento energizado. Por encima de los 30 mA se vuelve muy peligroso, ya que se pueden ocasionar daños en el cuerpo. En la figura 2 se muestra el símbolo ISO actualmente utilizado en señales para representarlo.



Figura 2. Símbolo ISO de choque eléctrico.

1.10. Arco Eléctrico

El arco eléctrico es el fenómeno causado cuando la tensión eléctrica presente entre dos puntos supera el límite de rigidez dieléctrica del aislante. Este se da por una mal funcionamiento o desperfecto del equipo, ya sea por una falla entre fases o entre fase y tierra, lo que libera gran energía en un corto tiempo. Esta energía puede llegar a alcanzar temperaturas de elevada magnitud, pudiendo alcanzar varios miles de grados Celsius, provocando ceguera, sordera y quemaduras. La onda expansiva del arco debida a la sublimación de los materiales conductores de la instalación afectada se transforma volumétricamente de 1 a 66.000 partes, lo que produce una proyección del operario, separándolo de la instalación defectuosa, llegando a provocarle daños físicos importantes. La energía térmica generada y/o la onda expansiva puede, en la peor de las situaciones, ocasionar la muerte de los trabajadores expuestos al arco. El riesgo al arco eléctrico está asociado con la liberación de energía del relámpago y los daños que esta pueda ocasionar en los trabajadores y en la instalación.

Causas

Las principales causas de la ocurrencia de un arco eléctrico son:

- Errores humanos, ya sea por contacto accidental, olvido de herramientas, trabajos sobre interruptores equivocados, entre otros.
- Roedores, felinos u otros animales que se introducen en los tableros.
- Humedad, atmosferas acidas, condensación y corrosión.
- Fallas de aislación por envejecimiento de aislantes en cables o empalmes, siendo este último uno de los grandes motivos que producen arcos eléctricos sin intervención humana.

En la figura 3 se muestra el símbolo ISO actualmente representado en señales.



Figura 3. Símbolo ISO arco eléctrico.

Fases del Arco Eléctrico

Las primeras fases producidas por un arco eléctrico en el interior de un tablero ocurren en los tiempos aproximados mostrados en la figura 4 y pueden diferenciarse en:

1. Fase de Compresión

El volumen de aire ocupado por el arco se sobrecalienta a causa del aporte ininterrumpido de energía, lo que produce que el restante aire del interior del tablero se caliente, ya sea por convección o radiación. Al principio los valores de presión y temperatura difieren zona a zona.

2. Fase de Expansión

Desde el inicio, se produce un aumento de la energía interna, llegando en esta fase a su máxima magnitud y debido a la liberación del aire caliente por alguna apertura, comienza a disminuir.

3. Fase de Emisión

Casi todo el aire es expulsado bajo una leve y constante sobrepresión, como consecuencia de la energía continua aportada por el arco.

4. Fase Térmica

Luego de la expulsión del aire, la temperatura en el interior del tablero se aproxima a la temperatura del arco. Esta fase dura hasta la extinción del arco. Todos los aislantes y metales que participaron del fenómeno sufren degradación, formándose gases, humos y partículas de material fundido.

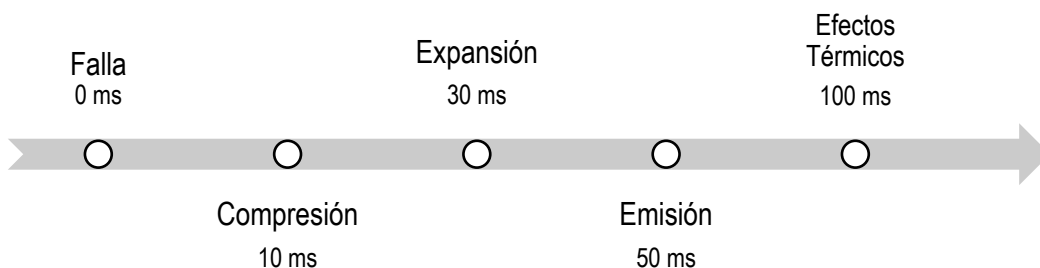


Figura 4. Tiempos aproximados de las fases del arco eléctrico.

El Arco Eléctrico en Laboratorios

Al momento de estudiar en forma práctica el fenómeno de arco eléctrico, se precede a realizar el ensayo del mismo, en donde se puede observar como luego de generar una falla intencionalmente, se proyecta material sublimado y el operario, representado por un maniquí, es expulsado de su posición normal de trabajo. Además, los vapores de cobre-bronce generados pueden producir graves daños en el operario.

En la figura 5 se muestran algunos fotogramas extraídos de la filmación de una prueba de indumentaria de protección, con el propósito de observar el fenómeno de arco eléctrico. En esta prueba se parte de producir un arco eléctrico con determinadas características frente a un maniquí de material no inflamable ni metálico. Este tema se abordará con más detalle en la sección “Elementos de Protección Personal”.

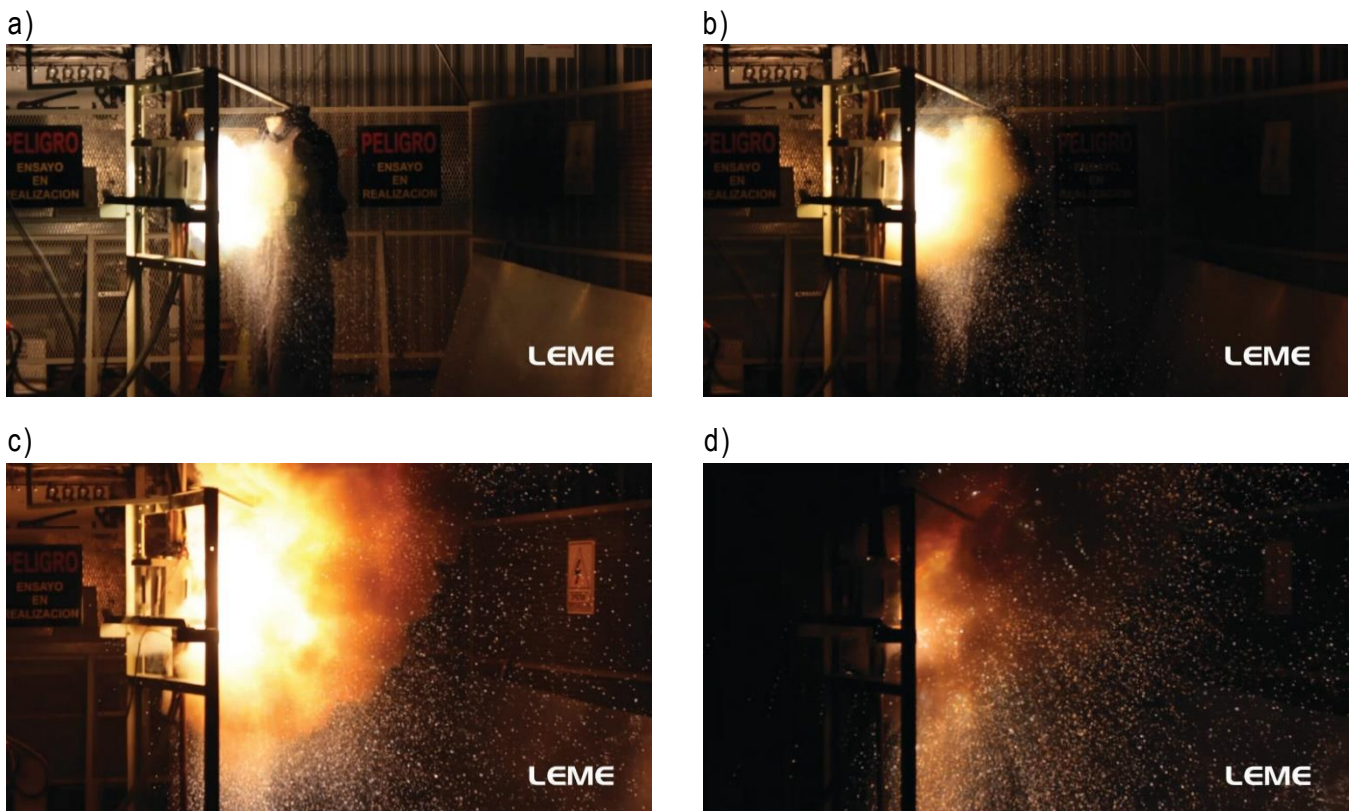


Figura 5. Ensayo de arco eléctrico sobre indumentaria. Fuente: LEME.

1.11. Energía Incidente

La energía incidente es la cantidad de energía que recibe una superficie a una cierta distancia de la fuente que generó el evento de arco eléctrico. Una de las unidades utilizadas para medir la energía incidente es caloría por centímetro cuadrado (cal/cm^2 ; $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$).

1.12. Elementos de Protección Personal

El EPP es considerado como la última línea de defensa del trabajador. Estos elementos protegen a los operarios de golpes, caídas, gases tóxicos, del fuego y del arco eléctrico. Al realizar trabajos en instalaciones o equipos energizados o cerca de estos, todos los operarios deben utilizar los EPP correspondientes y certificados para las características de la instalación, es decir, tensión y energía incidente calculada.

La realidad muestra que, ya sea por accidente, negligencia o por falla de alguno de los equipos de una instalación eléctrica, el operario puede quedar expuesto a un arco eléctrico. Es por eso que todo operario debe estar capacitado, entrenado y provisto de los EPP adecuados para realizar las correspondientes tareas dentro de una instalación eléctrica.

Es sumamente importante que toda persona que efectúe tareas dentro de una instalación eléctrica, ya sean de montaje, mantenimiento, reparación u operación de equipamiento, disponga de la indumentaria adecuada, la que deberá estar cuidadosamente elegida, probada y mantenida en perfecto estado.

1.12.1. Categorías de Elementos de Protección Personal

La norma NFPA 70E enumera cuatro categorías de EPP, dependiendo de los niveles de energía incidente que como mínimo protegen, expresados en cal/cm², como se muestra en la Figura 6. Una quinta categoría, que en versiones anteriores se nombraba como categoría 0, no se menciona en la versión actual ya que en ésta solo se especifica el EPP para el trabajo dentro del límite de protección contra arco.

La categoría de EPP requerida, se selecciona como aquella que como mínimo proteja de un valor de energía superior al nivel de energía incidente calculado en la evaluación de riesgo de arco eléctrico. Los EPP correspondiente a cada categoría se muestra en la figura 7.

Categoría	Nivel Mínimo de Protección Requerido [cal/cm ²]
1	4
2	8
3	25
4	40

Figura 6. Nivel mínimo de protección requerido según categoría.

Categoría	Elementos de Protección Personal
1	<p><u>Vestimenta Resistente a Arco Eléctrico, Protección como mínimo 4 cal/cm²</u></p> <p>Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco. Protección facial a prueba de arco (1) o capucha de traje a prueba de arco. Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP).</p> <p><u>Equipo de Protección</u></p> <p>Casco de seguridad Gafas de seguridad (SR) Protección auditiva (tipo tapón) (3) Guantes de cuero para trabajo pesado (2) Zapatos de seguridad (OP)</p>
2	<p><u>Vestimenta Resistente a Arco Eléctrico, Protección como mínimo 8 cal/cm²</u></p> <p>Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco. Capucha de traje a prueba de arco o protección facial (1) y pasamontañas a prueba de arco. Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP).</p> <p><u>Equipo de Protección</u></p> <p>Casco de seguridad. Gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tipo tapón). (3) Guantes de cuero para trabajo pesado. (2) Zapatos de seguridad (OP)</p>
3	<p><u>Vestimenta Resistente a Arco Eléctrico, Protección como mínimo 25 cal/cm²</u></p> <p>Camisa manga larga a prueba de arco (SN). Pantalón a prueba de arco (SN). Overol a prueba de arco (SN). Casaca de traje a prueba de arco (SN). Pantalón de traje a prueba de arco (SN). Capucha de traje a prueba de arco (SN). Guantes a prueba de arco. Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP).</p> <p><u>Equipo de Protección</u></p> <p>Casco de seguridad. Gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tipo tapón). (3) Zapatos de seguridad (OP).</p>

4	<p><u>Vestimenta Resistente a Arco Eléctrico, Protección como mínimo 40 cal/cm²</u></p> <p>Camisa manga larga a prueba de arco (SN). Pantalón a prueba de arco (SN). Overol a prueba de arco (SN). Casaca de traje a prueba de arco (SN). Pantalón de traje a prueba de arco (SN). Capucha de traje a prueba de arco (SN). Guantes a prueba de arco. Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP).</p> <p><u>Equipo de Protección</u></p> <p>Casco de seguridad. Gafas de seguridad (SR). Protección auditiva (tipo tapón). (3) Zapatos de seguridad (OP).</p>
<p><u>Referencias:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - OP: Opcional - SN: Según necesidad - SR: Selección Requerida - 1: El protector facial debe tener protección integral que no solo proteja la cara, sino también la frente, orejas y cuello o alternativamente se puede requerir el uso de una capucha a prueba de arco. - 2: Si se usan guantes aislantes de caucho con protectores de cuero, no son necesarios guantes de cuero o guantes a prueba de arco adicionales. La combinación de guantes aislantes de caucho con protectores de cuero satisface los requerimientos para una protección contra arco. - 3: Se permite el uso de otros tipos de protección auditiva o del tipo tapón en conjunto con otro tipo de protección siempre que se usen debajo de una capucha de arco eléctrico con clasificación de arco. 	

Figura 7. EPP según categoría.

1.12.2. Ensayos

Es necesario definir las propiedades y los requisitos que deben cumplir los EPP, como así también los métodos de ensayo a los que deben ser sometidos, teniéndose que especificar que ensayos son necesarios para garantizar el nivel de protección adecuado para la indumentaria en cuestión.

A nivel internacional existe gran consenso en lo que respecta a los ensayos de evaluación cualitativa que son realizados sobre los EPP, pero no es tan así en los ensayos de evaluación cuantitativa. La existencia de diversos parámetros de ensayo hace difícil la comparación de los resultados obtenidos para un mismo material, empleando diferentes métodos de prueba. Un ejemplo de esto comparar ensayos en donde solo se contempla el valor de la corriente de arco prevista, dejando sin especificar otros parámetros importantes como la duración del arco,

la distancia en que el material se encuentra del arco y la corriente real en el arco, donde todos estos factores influyen directamente en el valor de energía final incidente sobre el operario.

En Argentina, los requisitos y métodos de ensayo para materiales y EPP utilizados ante riesgo de exposición al arco eléctrico, se pueden encontrar en la norma IRAM 3904.

El ensayo consiste en exponer materiales o EPP a un arco eléctrico generado por una corriente entre dos electrodos, montados en una caja de yeso diseñada para tal fin que permite que la energía generada sea proyectada en una sola dirección. La norma IRAM aborda dos métodos, uno para materiales y otro para EPP ya confeccionados, diferenciando clase 1 (corriente de 4 kA) y clase 2 (corriente de 7 kA).

En el anexo 1, se puede observar en detalle las dimensiones y característica de la caja de yeso con sus correspondientes electrodos, mientras que, en la figura 5 se puede observar la disposición de la instalación de prueba para EPP, y en la figura 8 la disposición de la instalación de prueba para materiales.

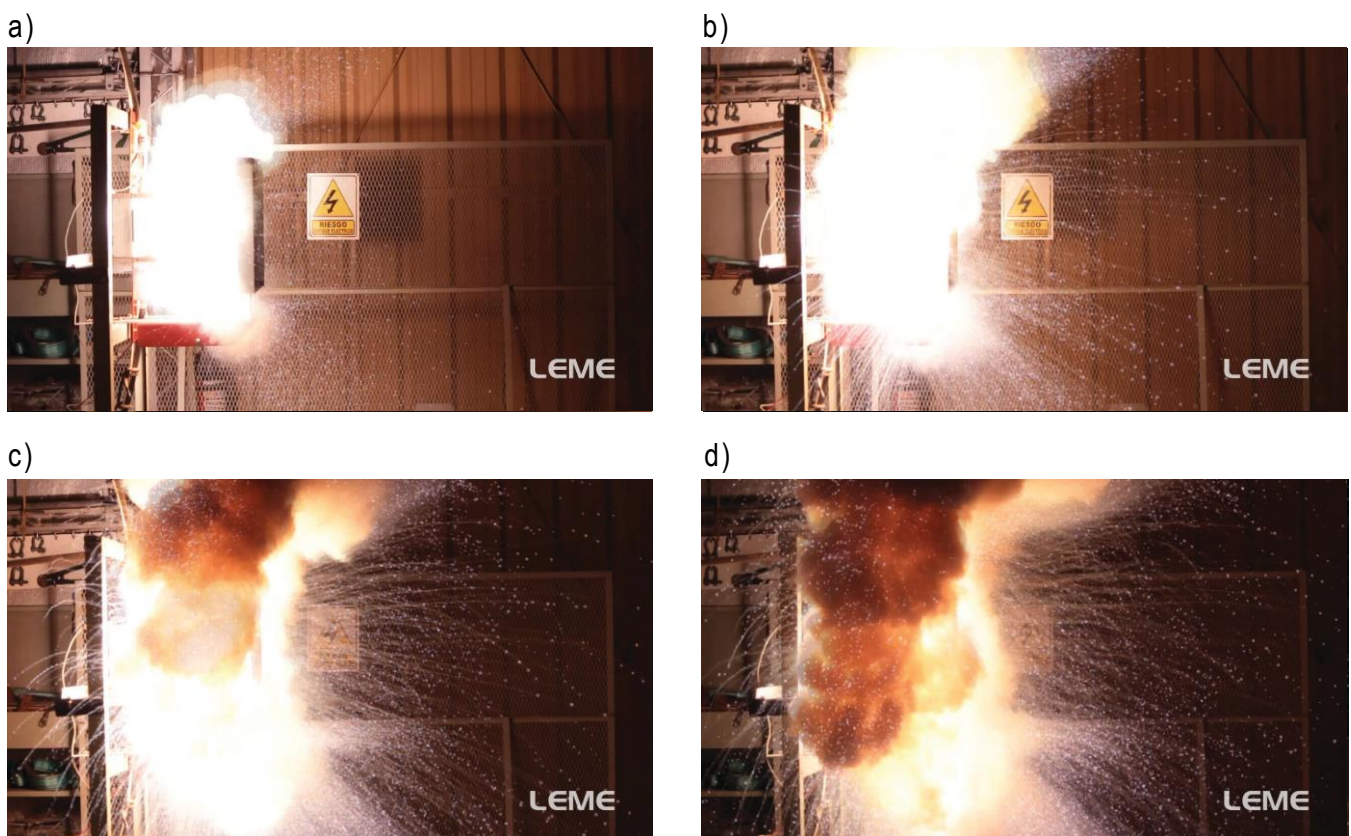


Figura 8. Ensayo de arco eléctrico sobre material. Fuente: LEME.

Se establece que antes de los ensayos las muestras deben ser sometidas a un tratamiento que consiste en lavados según norma IRAM-INTI-CIT G 7811 o ISO 3175-2, de acuerdo al tipo de material o prenda de que se trate.

Los resultados son aprobados cuando se cumplen los siguientes resultados:

- Tiempo de persistencia de la llama (si hubiera) menor o igual a 5 segundos.
- Ausencia de agujeros de más de 5 mm en el material y ausencia de fusión a través del material en dimensiones mayores a esta.
- Los elementos de cierre de la prenda deben funcionar adecuadamente después de la exposición al arco (en ensayos de EPP).

1.12.3. Categorías de los Tejidos y Materiales

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, ASTM, establece dos criterios según los cuales se puede caracterizar los tejidos y materiales a utilizar en EPP contra arco eléctrico:

- Valor del Rendimiento Térmico del Arco (*Arc Thermal Performance Value, ATPV*): es la energía incidente en un tejido o material que tiene una posibilidad del 50 % de transferir suficiente calor a través del tejido o material para causar el inicio de una quemadura de segundo grado.
- Umbral de Energía de Rotura (*Energy Breakopen Threshold, EBT*): es la energía incidente sobre un material que da como resultado una probabilidad del 50 % de rotura, donde se define como rotura cualquier área abierta de al menos 1,6 cm².

Es decir, EBT hace referencia a la resistencia mecánica del material, mientras que ATPV a la capacidad aislante del material.

ATPV y EBT son evaluados en la misma prueba, tomándose aquel que resulte el menor valor para clasificar al material según:

- Categoría 1: resiste como mínimo 4 cal/cm².
- Categoría 2: resiste como mínimo 8 cal/cm².
- Categoría 3: resiste como mínimo 25 cal/cm².
- Categoría 4: resiste como mínimo 40 cal/cm².

Los factores importantes que influyen en la clasificación de arco del sistema de protección son el peso de la tela, la confección y la construcción de la tela.

Inicialmente se utilizaban las dos clasificaciones en simultaneo, ATPV y EBT, antes mencionadas. Actualmente se decidió crear un etiqueta menos técnica y más fácil de interpretar para el usuario, la cual consta del término EBT y ATPV como subíndice o un apéndice al término clasificación de arco para seguridad profesional. Es decir, que actualmente es observable etiquetas con:

- Arco Valoración (ATPV) = X cal/cm².
- Arco Valoración (EBT) = X cal/cm².

En la clasificación de la ropa según la norma ASTM F1506-20, Norma para Especificación de Desempeño de Ropa Protectora Resistente a las Llamas y al Arco Eléctrico utilizada por Trabajadores Expuestos a Llamas y Arcos Eléctricos

(Standard Performance Specification for Flame Resistant and Electric Arc Rated Protective Clothing Worn by Workers Exposed to Flames and Electric Arcs), el tejido se somete a varias pruebas, incluyendo lavados e inflamabilidad vertical. Esta clasificación hace referencia a la resistencia a la llama tanto por arco eléctrico o por cualquier condición de fuego explícito.

1.13. Efectos Fisiológicos de la Corriente Eléctrica

Los efectos fisiológicos que la corriente eléctrica genera en el cuerpo humano son descriptos en la figura 9. Los efectos en la salud aumentan en función de la intensidad de la corriente y del tiempo de contacto. Se los describe considerando una frecuencia industrial típica de 50 Hz.

Intensidad	Efectos Fisiológicos en el Cuerpo Humano
1 mA – 3 mA	Percepción de picor. Se supera el umbral de percepción.
5 mA – 8 mA	Movimientos bruscos en caso de un contacto prolongado.
8 mA – 25 mA	Contracciones musculares y tetanización de los músculos de la mano y brazo.
25 mA – 30 mA	Tetanización del musculo del pecho (paso de corriente por el corazón) en contactos prolongados (más de 2 minutos), que pueden provocar asfixia.
30 mA – 50 mA	Fibrilación ventricular, consecuencia del paso de corriente por la región cardiaca. Muerte si no se facilita atención adecuada en pocos minutos.
2 A – 3 A	Paro respiratorio. Inconsciencia.
3 A o más	Quemaduras graves. Muerte.

Figura 9. Efectos fisiológicos de la circulación de la corriente eléctrica en el cuerpo humano a frecuencia industrial de 50 Hz.

1.14. Estadísticas de Seguridad Eléctrica

Como se ha explicado anteriormente, a partir de la toma de conciencia del riesgo y peligrosidad que implican ciertos trabajos relacionados con la energía eléctrica, comenzaron, a mediados de siglo pasado, las creaciones de entidades que abordan el tema y se ha ido recolectando información estadística a lo largo de los años posteriores a las implementaciones de dichas normas a fin de poder

conocer tanto la naturaleza y alcance de los incidentes como la eficacia de las nuevas reglamentaciones impuestas.

En la figura 10 se detallan los datos estadísticos de la OSHA en Estados Unidos, desde principios de la década de 1990 hasta finales de la primera década del siglo XXI.

Todos los organismos que se encuentran relacionados con la OSHA tienen como obligación compartir, exponer y detallar los accidentes que hayan sucedido en sus instalaciones por dos motivos fundamentales. El primero es que es sumamente importante poder realizar un seguimiento de la cantidad de lesiones laborales que ocurran. El segundo, y no menos importante, es el de conocer la naturaleza de los incidentes para así poder investigar su causa y como evitar una posterior reincidencia del hecho.

Lesiones por Contacto Eléctrico Fatales y No Fatales			
Año	Cantidad de Lesiones con Pérdida de Tiempo	Cantidad de Fatalidades	Trabajadores Registrados (Millones)
1992	4.806	317	124
1996	4.126	268	133
2000	3.704	256	141
2004	2.650	254	145
2009	2.960	192	145

Figura 10. Estadísticas de accidentes laborales por causas eléctricas en Estados Unidos.

Como puede verse con el comienzo de la implementación de las distintas normas, ya detalladas en oportunidades anteriores, las estadísticas en 17 años se vieron reducidas en cifras cercanas a la mitad, no solo en cantidad de lesiones con pérdidas de tiempo, sino también en fatalidades, con una cantidad de trabajadores registrados en aumento, lo que indica aún más la mejora debido a su implementación.

Con el objetivo de lograr una mejor visualización, estos datos fueron volcados en las figuras 11, 12 y 13, donde se muestra la tendencia de disminución de lesiones y fatalidades en el periodo entre 1992 y 2010, solo observándose un pequeño incremento en las lesiones del último intervalo considerado, probablemente debido al aumento de los trabajadores registrados.

Finalmente es importante hacer énfasis en el análisis de las ventajas obtenidas al disminuir los accidentes de todo tipo y particularmente los de naturaleza eléctrica en ámbitos laborales. En primer lugar, no se puede dejar de mencionar, el aspecto humano, protegiendo la vida y la integridad de los trabajadores, y en segundo lugar, para beneficio del empleador, si bien en un principio se requiere de una inversión inicial, se verá sumamente justificada al evitar problemas posteriores, como lo pueden ser pérdidas de horas trabajadas posteriores a un accidente, o el resarcimiento económico que se debe otorgar a cualquier trabajador al sufrir algún tipo de lesión. Es por esto que la aplicación de documentos (procedimientos, guías, etc.) que aseguren la salud integral de los trabajadores es beneficioso para todos los actores que intervienen.

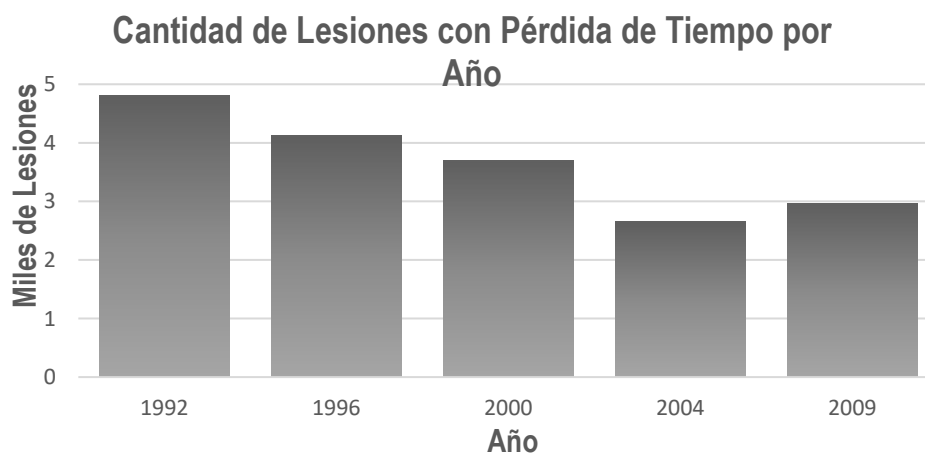


Figura 11. Evolución de lesiones con pérdidas de tiempo.

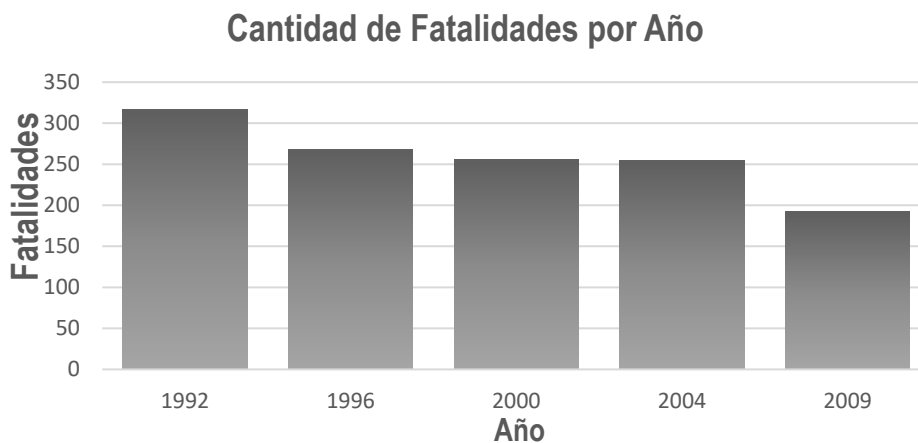


Figura 12. Evolución de fatalidades.

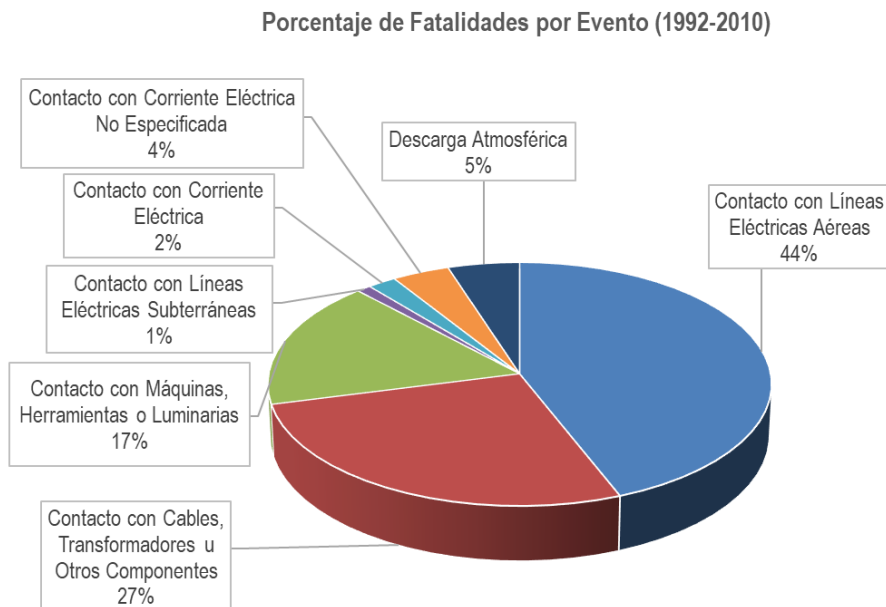


Figura 13. Distribución de eventos causantes de fatalidades.

1.15. Distancias de Seguridad

Mantener una distancia segura de aproximación a los conductores o partes de circuitos eléctricos energizados expuestos, es un medio efectivo para mantener la seguridad eléctrica. A medida en que disminuye la distancia entre la persona y los conductores o partes de circuitos energizados expuestos, aumentan la probabilidad de accidentes eléctricos.

En una Evaluación de Riesgo de Arco Eléctrico, denominada así en la NFPA 70E a partir de la edición 2015, previamente nombrada como Análisis de Arco Eléctrico, se determinan las distancias de seguridad de una determinada instalación y posteriormente se indican en etiquetas adheridas a la misma, con el propósito de que todo operario conozca los riesgos y los elementos de EPP requeridos para transitar u operar la instalación adecuadamente. Estas evaluaciones se deben hacer cada 5 años.

Las distancias que deben ser indicadas son las siguientes:

1. Límite de Aproximación Prohibida

El límite de aproximación prohibida es la distancia límite de aproximación a un conductor energizado o parte de un circuito energizado expuesto, a partir de la cual se considera que el trabajador va a entrar en contacto con el conductor energizado o será parte de un circuito energizado expuesto si se ubica a una distancia menor a ésta. Entre este límite y la parte energizada de la instalación va a estar trabajando el operario calificado con su correspondientes EPP. Este va a estar expuesto al arco eléctrico y al choque eléctrico.

Este límite se utilizó en versiones anteriores de NFPA 70E, pero ya no se hace referencia a él. Sin embargo, el término todavía se utiliza en aplicaciones de investigación eléctrica.

2. Límite de Aproximación Restringida

El límite de aproximación restringida es el límite de aproximación para personas calificadas a componentes eléctricos expuestos y energizados donde existe una mayor probabilidad de choque eléctrico, debido a un arco eléctrico ocasionado por un movimiento involuntario. Solo personas calificadas pueden cruzar este límite, y las mismas deberán estar protegidas contra contacto inesperado con conductores energizados expuestos o partes del circuito. Trabajar dentro de dicha área solo es aceptable si se ha completado y aprobado una evaluación de trabajo eléctrico energizado.

3. Límite de Protección contra Arco

El límite de protección contra arco es la distancia desde los componentes eléctricos expuestos y energizados a partir del cual una persona podría recibir una quemadura de segundo grado si se produjera un arco eléctrico. En este límite va a haber 1,2 cal/cm² sin importar cuantas cal/cm² haya en la parte energizada de la instalación. El personal debe utilizar los EPP apropiados para arco eléctrico antes de cruzar este límite. Entre este límite y el anterior mencionado va a trabajar el ayudante o segundo hombre que va estar expuesto al arco eléctrico.

En este límite es en el cual se van a instalar los postes con cadenas o cintas que prohíben el paso de cualquier persona que no esté protegida adecuadamente para ingresar a esta área.

4. Frontera de Límite de Aproximación

La frontera de límite de aproximación es la distancia de acercamiento a los componentes eléctricos expuestos y energizados a partir de la cual existe un riesgo de choque eléctrico. Es el límite de aproximación para personas no calificadas. Las personas no calificadas solo pueden cruzar este límite si están bajo la supervisión directa de una persona calificada y usan los EPP apropiados para los peligros involucrados.

Estas 4 distancias fundamentales en la seguridad de los operarios pueden verse representadas en la figura 14.

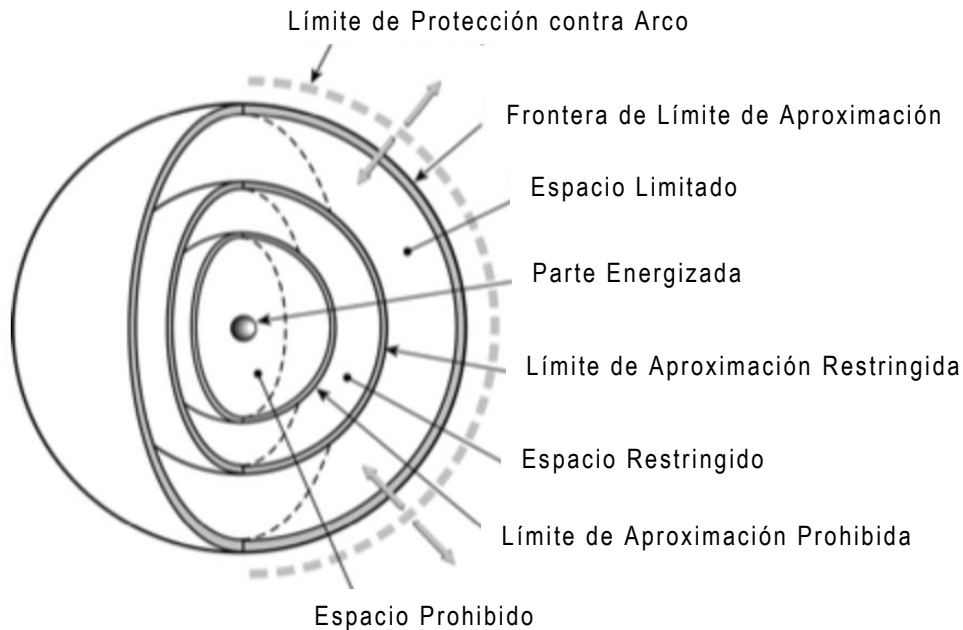


Figura 14. Límites de aproximación. Fuente: NFPA 70E.

1.16. Modelo de Etiqueta

La etiqueta es de formato libre, es decir, se puede utilizar aquel que se estime conveniente. En la figura 15 se puede observar un ejemplo de la misma.

Está conformada por 4 partes:

1. La primera hace referencia a la advertencia propiamente dicha.
2. La segunda describe las 6 características principales que deben incluirse. Las mismas son obtenidas del análisis mediante un programa informático, por ejemplo: Etap, SKM Power Tools, en donde por medio de algoritmos utilizando el documento correspondiente se obtendrán los siguientes valores:
 - a) Voltaje.
 - b) Energía incidente en cal/cm² o J/cm².
 - c) Frontera de límite de aproximación.
 - d) Límite de protección contra arco.
 - e) Límite de aproximación restringida.
 - f) Límite de aproximación prohibida.
3. La tercera parte describe todo el EPP necesario tanto para protección contra arco eléctrico como para choque eléctrico.
4. La cuarta indica los datos del equipo, ubicación y la fecha de la evaluación de arco eléctrico.

 ADVERTENCIA		
 Peligro de Arco y Choque Eléctrico 		
Obligatorio el Uso de EPP Apropriado		
Tensión Nominal del Sistema	380 V (CA)	2,3 cal/cm² a 0,457 m
Energía Incidente	2,3 cal/cm ²	
Frontera de Límite de Aproximación	1,067 m	
Límite de Protección Contra Arco	0,682 m	
Límite de Aproximación Restringida	0,305 m	
Límite de Aproximación Prohibida	0,025 m	
Guantes Categoría	00	
EPP Obligatorio: Categoría 1 (4 cal/cm²)		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco ▪ Protección facial a prueba de arco o capucha de traje a prueba de arco ▪ Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP) ▪ Casco de seguridad ▪ Gafas de seguridad (SR) ▪ Protección auditiva (tipo tapón) ▪ Guantes de cuero para trabajo pesado ▪ Zapatos de seguridad (OP) 		
Identificación de Equipo: TGBT		Ubicación: Edificio Principal
Fecha de Evaluación de Arco Eléctrico: 03/03/2021		

Figura 15. Modelo de etiqueta.

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN DE RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

2.1. Descripción de la Práctica

En este proyecto se realizó el análisis y estudio de cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones y evaluación de riesgo de arco eléctrico de una industria, cuyo esquema de distribución, está configurado en forma radial. A fin de poder ejemplificar el tratamiento de este tipo de problemática, el análisis quedó reducido a un modelado de la instalación realizado con la información relevada del lado de BT y en la barra de la instalación que se consideró de mayor criticidad por ciertas características, como corriente de cortocircuito más elevada, mayor energía incidente y por lo tanto mayor la categoría requerida de EPP. Se consideró además que los tableros están en una sala común, por lo tanto, el operario debe tener protección ante la máxima falla posible.

Se pueden ver los unifilares utilizados en el anexo 2-A y 2-B, siendo estos el esquema unifilar simplificado y el esquema unifilar del tablero general de baja tensión (TGBT) respectivamente.

La instalación es abastecida desde la empresa distribuidora de energía que posee dicha concesión, en un nivel de tensión de 33 kV con una potencia de cortocircuito de 350 MVA, datos que resultan fundamentales para los cálculos llevados a cabo.

Los objetivos fueron en primera instancia analizar las posibles corrientes de cortocircuito en cada barra, analizar y estudiar la coordinación y selectividad de las protecciones de dicha instalación, llevar a cabo la evaluación de riesgo de arco eléctrico en esas circunstancias y finalmente evaluar mejoras tecnológicas que podrían disminuir los riesgos.

Estos estudios realizados buscaron maximizar la seguridad del ambiente laboral de los trabajadores, determinando los EPP, y la seguridad de la instalación, mediante el análisis de las configuraciones de las protecciones.



Figura 16. Operario trabajando con el EPP. Fuente: Revista Megavatios.

2.2. Desarrollo Práctico

Se comenzó con el desarrollo práctico del proyecto, procediendo a cargar los esquemas unifilares de la instalación, detallando distribución, cargas y dispositivos de maniobra y protección en el programa informático utilizado, SKM Power Tools. Este programa permitió visualizar distintos esquemas unifilares, cada uno de ellos con diferente caudal de información.

A través de dicha herramienta informática, se realizaron los estudios de cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones y evaluación de riesgo de arco eléctrico, tal cual fue explicado en el capítulo anterior. En la figura 17 se muestra una captura del programa, donde se indican las corrientes de cortocircuito en las barras estudiadas de la instalación.

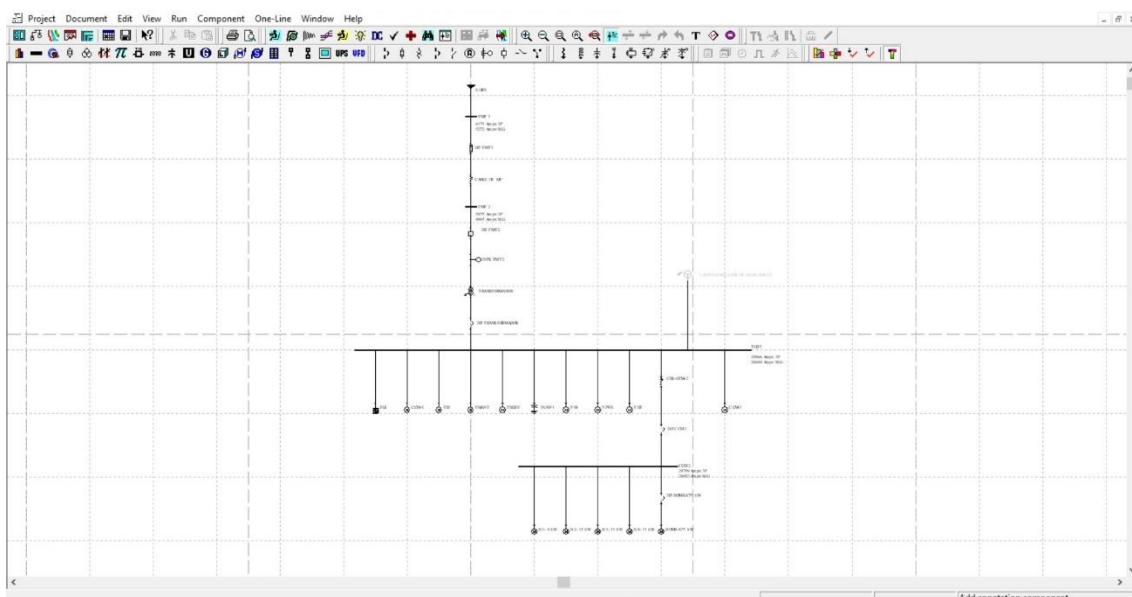


Figura 17. Captura de pantalla SKM, unifilar con corrientes de cortocircuito.

El análisis realizado constó de cuatro simulaciones con diversas configuraciones de las protecciones de la instalación, con el objetivo de poder realizar una evaluación integral sobre la importancia de las mismas.

Se realizaron dos análisis fundamentales en la instalación. En el primero se tuvo en cuenta el centro de control de motores número 2 (CCM 2) y su mayor carga para realizar el análisis y estudio de la coordinación y selectividad de protecciones. En el segundo, se evaluó la mayor energía incidente en la instalación y se determinó su ubicación, siendo esta en el TGBT, donde se llevó a cabo el análisis.

2.2.1. Cargas y Transformador

La instalación analizada cuenta con una entrada en nivel de tensión 33 kV, una línea interna de aproximadamente 800 m hasta una celda de media tensión (MT), para luego conectar a un transformador de 1000 kVA con una relación de transformación 33/0,38/0,231 kV, conexión triángulo-estrella con neutro a tierra.

El transformador alimenta una barra partida, vinculada a través de un interruptor que permanece cerrado en funcionamiento normal, mientras que en situaciones específicas, éste se abre y se pone en funcionamiento el generador de 320 kVA que permite conservar las cargas críticas para la instalación.

La naturaleza de las cargas analizadas varía desde iluminación, servicios auxiliares, hasta fuerza motriz, siendo en su amplia mayoría bombas centrifugas accionadas por motores eléctricos.

Se adjunta el anexo 2-C, el esquema unifilar de cargas y transformador con la información que se cargó como dato en el programa informático empleado.

2.2.2. Corrientes Nominales

Las corrientes nominales (I_n) en cada barra y en cada componente de la instalación se obtuvieron de las simulaciones realizadas en el programa informático. Estas corrientes se ven en forma resumida en el cuadro de la figura 18 y en el esquema unifilar con los detalles de las corrientes mencionadas adjuntado en el anexo 2-D.

Barras en Operación		
Barra	Nivel de Tensión [V]	Corriente Nominal [A]
TMT 1	33.000	11,04
TMT 2	33.000	11,04
TGBT	380	958,94
CCM 2	380	208,46
<u>Referencias:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> - TMT 1: Tablero de MT número 1. - TMT 2: Tablero de MT número 2. - TGBT: Tablero General de BT. - CCM 2: Centro de Control de Motores número 2. 		

Figura 18. Resumen de corrientes nominales.

2.2.3. Análisis del Cortocircuito

Al igual que las corrientes nominales, las corrientes de cortocircuito fueron obtenidas por medio del programa informático.

Se muestran los valores de las corrientes de cortocircuito trifásicas en cada barra en el cuadro de la figura 19 y en forma más esquemática en el unifilar adjuntado en el anexo 2-E.

Barras en Operación		
Barra	Nivel de Tensión [V]	Corriente de Cortocircuito Trifásica [A]
TMT 1	33.000	6.171
TMT 2	33.000	5.875
TGBT	380	29.966
CCM 2	380	29.799
<u>Referencias:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> - TMT 1: Tablero de MT número 1. - TMT 2: Tablero de MT número 2. - TGBT: Tablero General de BT. - CCM 2: Centro de Control de Motores número 2. 		

Figura 19. Resumen de corrientes de cortocircuito trifásica.

2.2.4. Coordinación y Selectividad de Protecciones

Como se mencionó anteriormente, el trabajo se centró particularmente en el CCM 2 y más específicamente en la bomba de 75 kW, para el análisis de la coordinación y selectividad eléctrica.

Se adjuntan las gráficas corriente-tiempo de los equipos eléctricos que intervienen en los estudios, a fin de mostrar las configuraciones de los mismos.

A fin de poder establecer conclusiones fehacientes y en concordancia con los objetivos del proyecto, se realizaron cuatro configuraciones de la protección aguas abajo del transformador, la DP. TRANSFORMADOR, desde la situación más conservadora hasta la menos conservadora, siendo el termino conservador asociado a la seguridad del operario, es decir, a que las protecciones se configuran lo más ajustadas a las corrientes de la instalación.

Estas cuatro variantes fueron realizadas siempre considerando la misma configuración de las protecciones en el lado alta tensión del transformador. En los sucesivos desarrollos se analizaron las configuraciones de la protección mencionada en el lado de BT, donde se estudió la coordinación y selectividad correspondiente, realizando las modificaciones pertinentes en los casos necesarios.

Configuración del Primario - AT

Si bien el análisis realizado estuvo basado en el lado de BT del transformador, se disponen a continuación, en las figuras 20 y 21, las curvas corriente-tiempo de las protecciones en el lado primario del mismo, a fin de tener en cuenta los ajustes en forma integral empleados en la instalación.

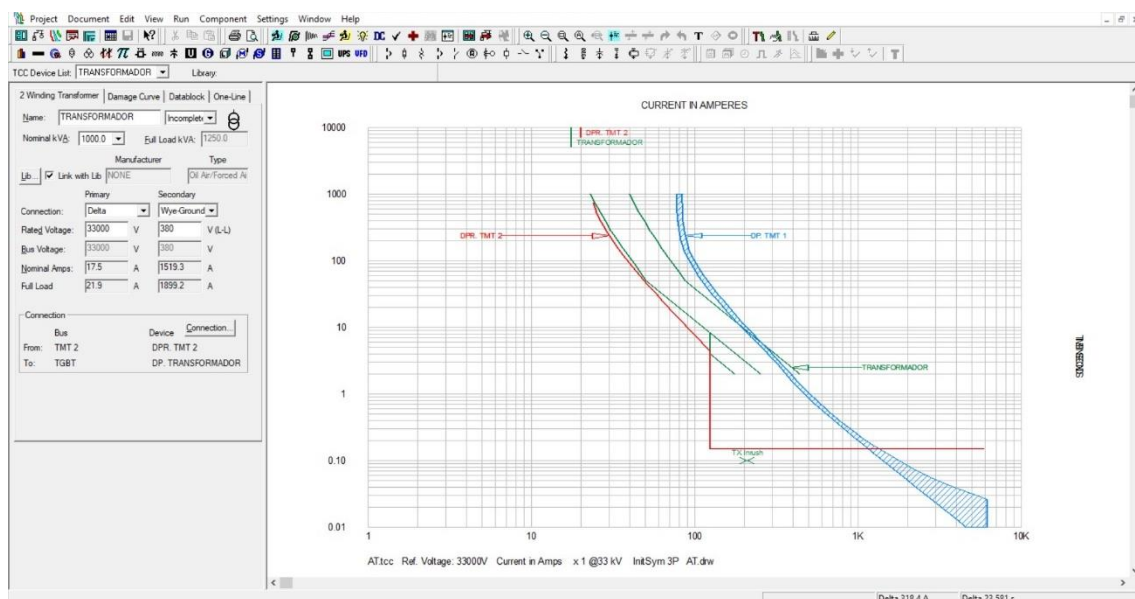


Figura 20. Captura de pantalla SKM, gráfica corriente-tiempo, AT.

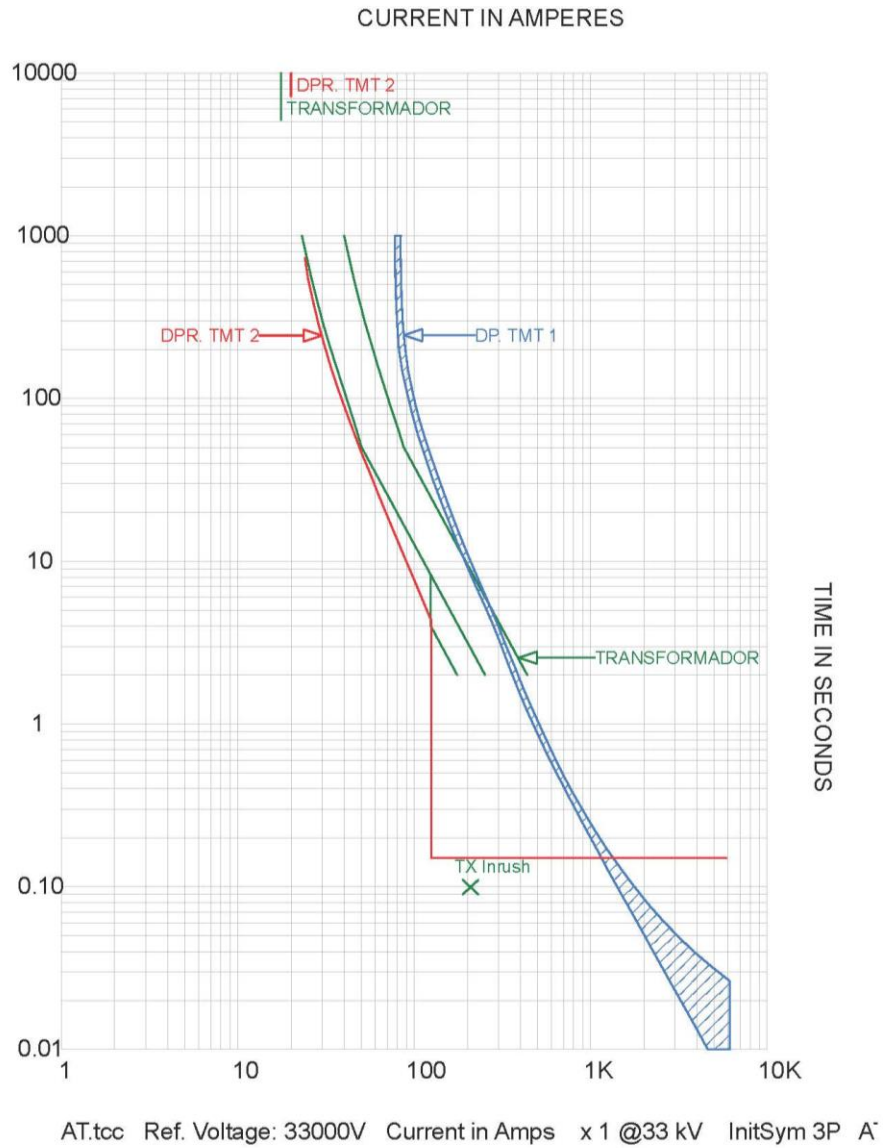


Figura 21. Gráfica corriente-tiempo, AT.

Configuración del Secundario - BT

Configuración 1

La configuración 1 de las protecciones fue la más conservadora de todas las evaluaciones realizadas sobre la barra del TGBT, es decir, que en esta se hizo fundamentalmente hincapié en una disposición más ajustada de los parámetros eléctricos. Por lo tanto, cuando sobrepasen las magnitudes seleccionadas, en forma rápida, actúan los elementos de protección correspondientes, hecho que puede apreciarse en la figura 22 y 23, observando las gráficas corriente-tiempo. En ellas se representan al fusible y a los interruptores como DP (Dispositivo de Protección), y al relé como DPR (Dispositivo de Protección Relé).

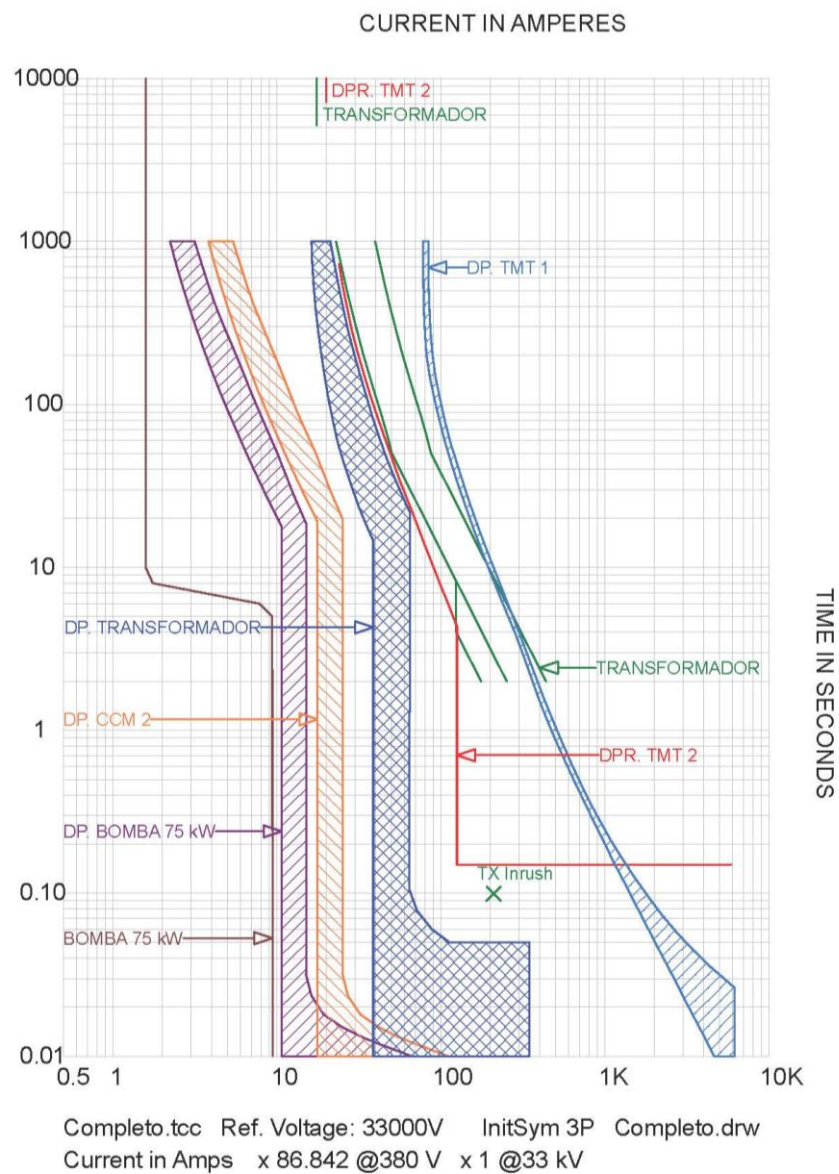


Figura 22. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 1, AT y BT.

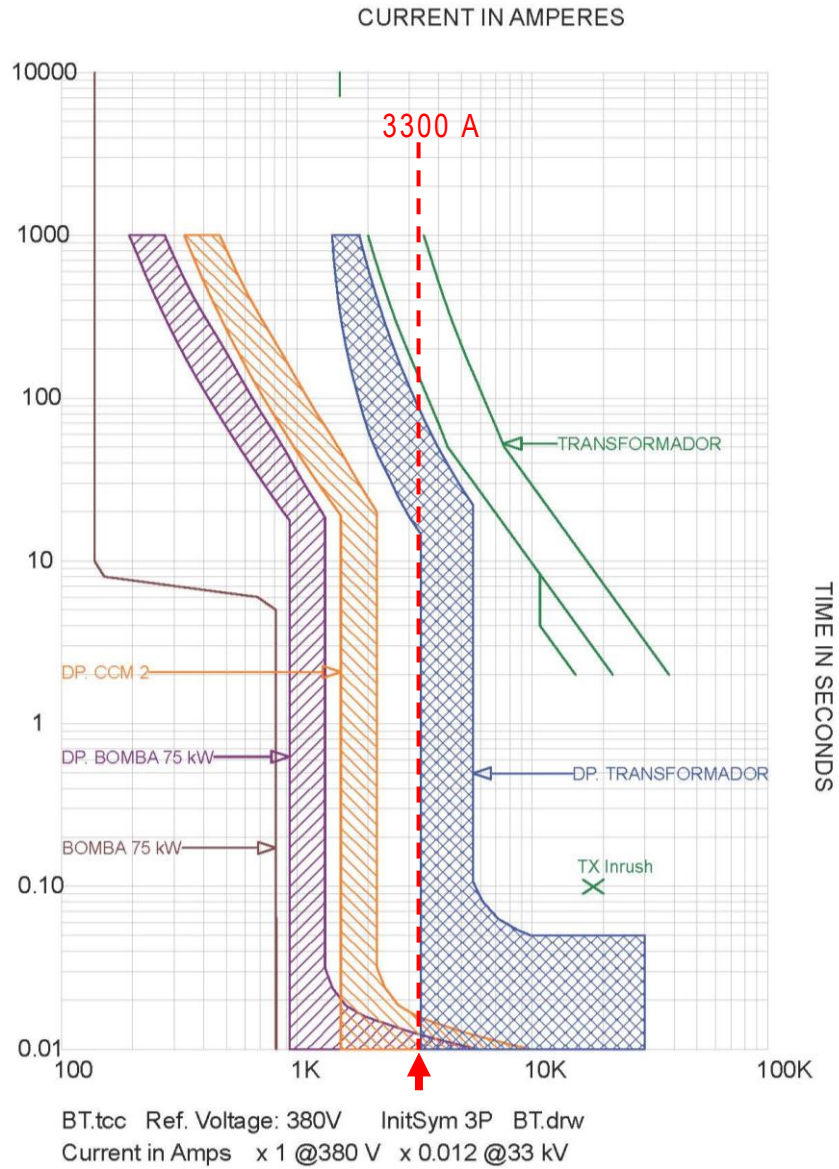


Figura 23. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 1, BT.

Configuración 2

La configuración 2 presentó parámetros menos rígidos con posibilidad de mayores variaciones sin que las protecciones en cuestión actúen abriendo el circuito, esto se puede ver claramente en las gráficas corriente-tiempo de la figura 24 y 25.

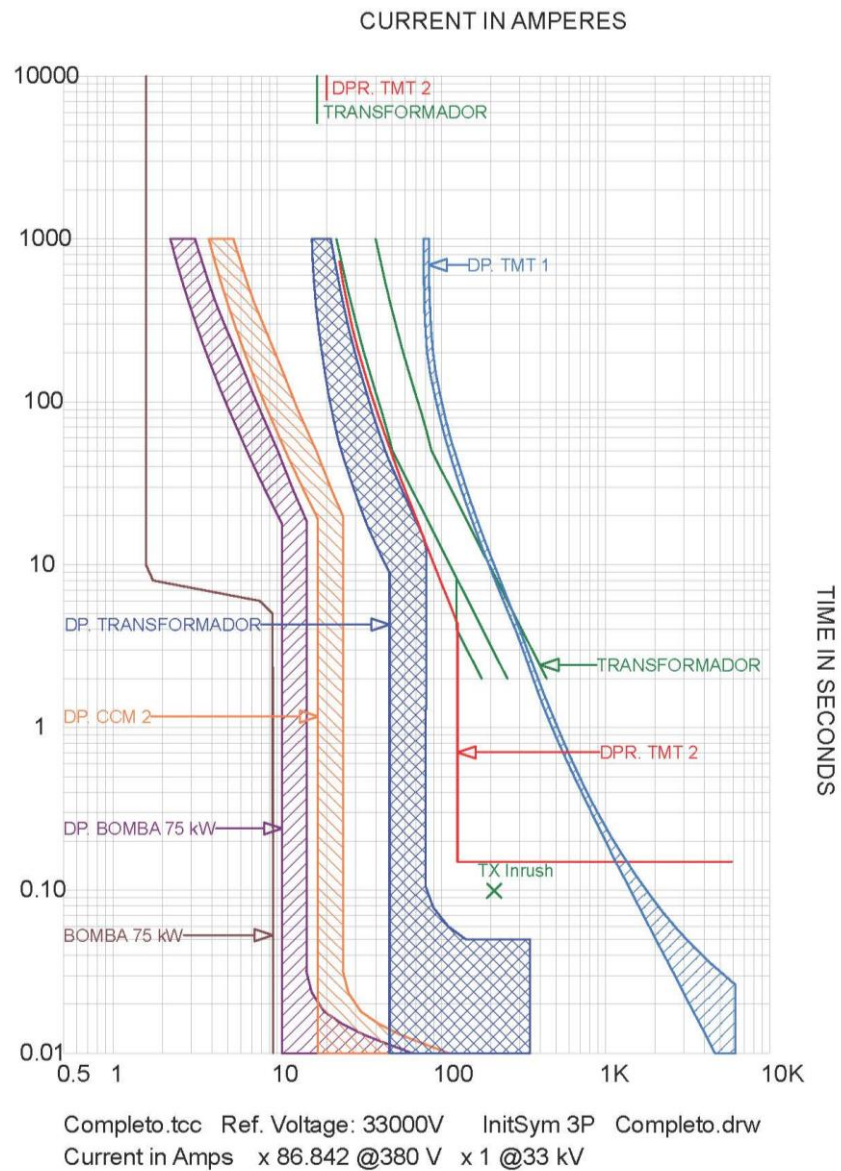


Figura 24. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 2, AT y BT.

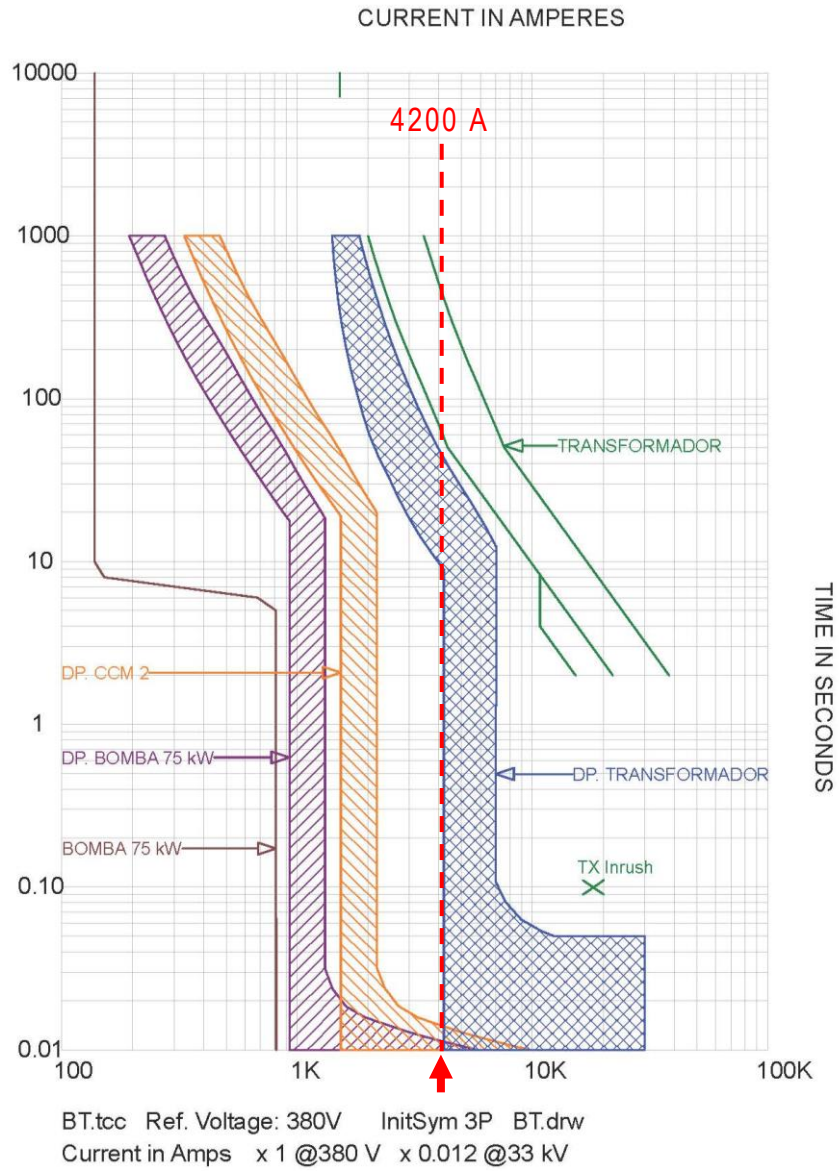


Figura 25. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 2, BT.

Configuración 3

La configuración 3 presentó unos parámetros aún menos rígidos que las dos anteriores. Las configuraciones de sus protecciones se muestran en las figuras 26 y 27.

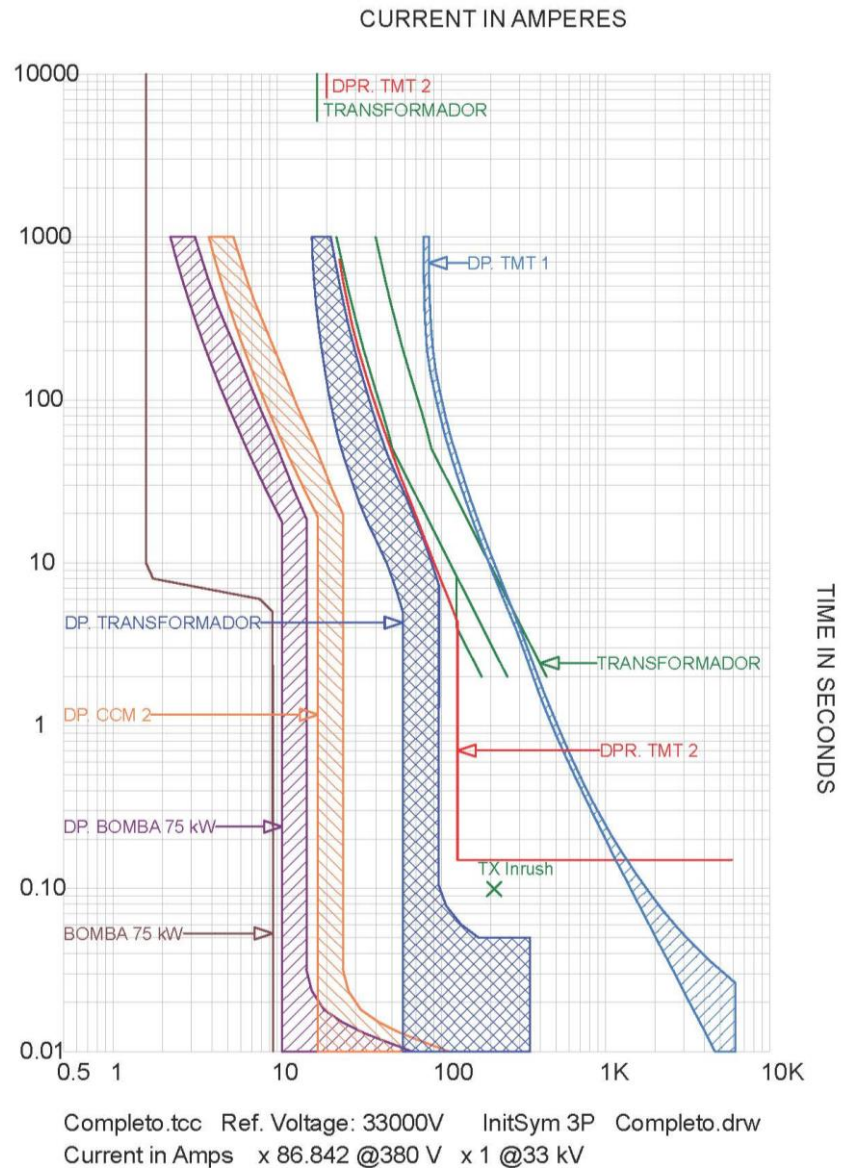


Figura 26. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 3, AT y BT.

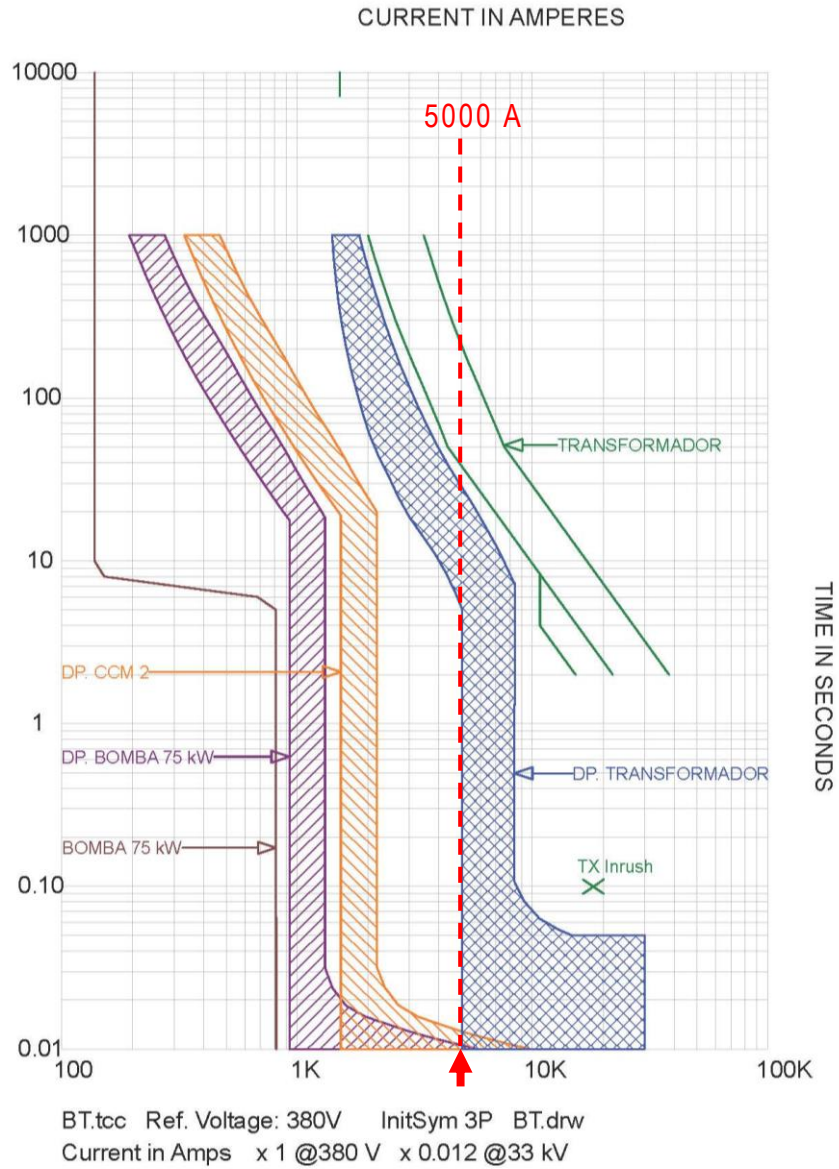


Figura 27. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 3, BT.

Configuración 4

La configuración 4 se realizó a modo de poder ejemplificar las grandes consecuencias en cuanto a seguridad, que puede ocasionar una no adecuada configuración de las protecciones.

En las figuras 28 y 29 se muestran las curvas obtenidas para esta configuración de protecciones.

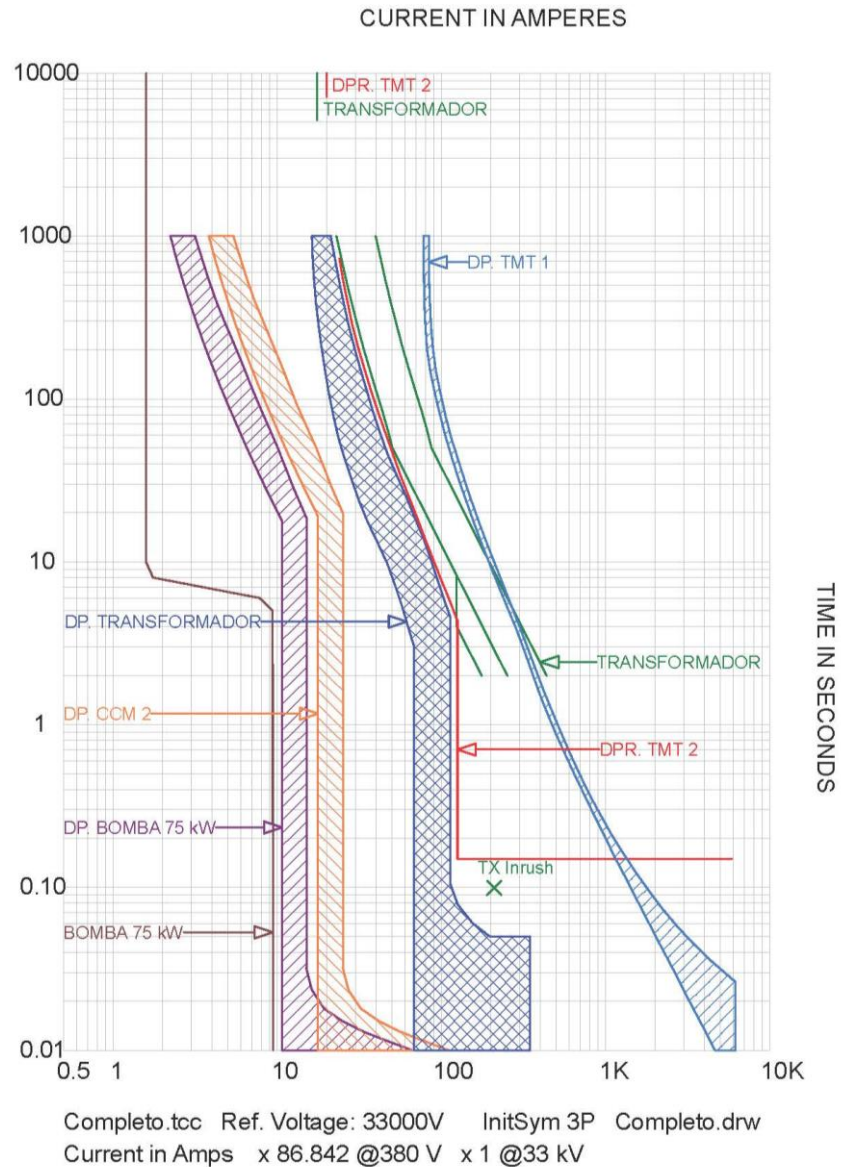


Figura 28. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 4, AT y BT.

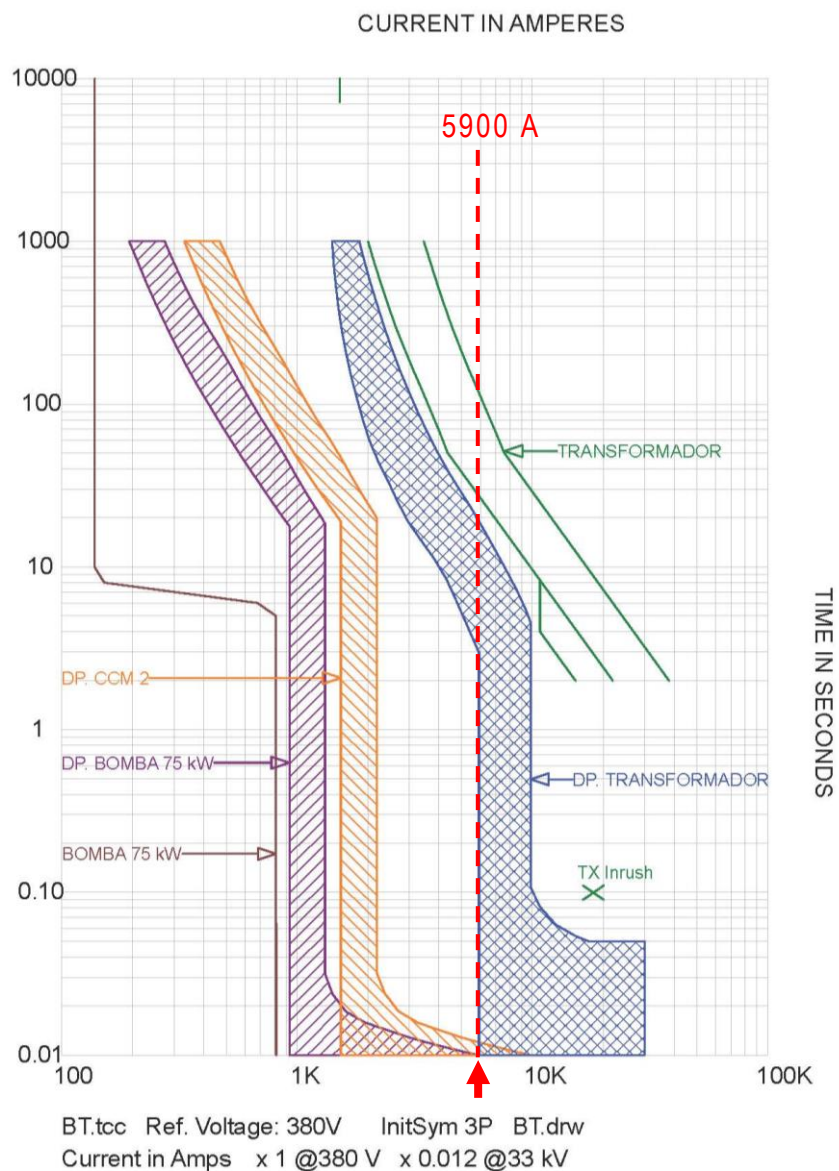


Figura 29. Gráfica corriente-tiempo de la configuración 4, BT.

2.2.5. Evaluación de Riesgos de Arco Eléctrico

Como se explicó en el anterior capítulo, el fenómeno de arco eléctrico se genera ante la ocurrencia de un cortocircuito a través de la ionización del aislante entre un conductor y tierra u otro conductor, propiciado por las condiciones ambientales y del origen de la falla. Si bien puede comenzar como un cortocircuito fase-tierra, fase-fase, etc., siempre terminará como un cortocircuito trifásico debido a la ionización del aislante. Cuando se produce este fenómeno la explosión irradia luz ultravioleta, infrarroja, ondas de choque y desprendimiento de partículas de metal fundido, alcanzando altas temperaturas a las cuales el material comienza a sublimarse.

Es por esta problemática que el operario encargado de manipular los equipos eléctricos o aquel que se encuentre en las cercanías de los mismos está bajo un potencial peligro de sufrir lesiones, por lo que la utilización de los EPP y la implementación de los procedimientos adecuados minimizan el riesgo de las personas en su ambiente laboral son de vital importancia. Para reducir al máximo estos riesgos, se debe conocer tanto la corriente máxima de cortocircuito del sistema como la energía liberada. Con estos valores, y en base a los distintos niveles de tensión, se pueden seleccionar los EPP adecuados. Es importante destacar que los elementos por sí solos no protegen al operario, sino que se debe complementar con capacitación necesaria a fin de destacar la importancia de los EPP y de su correcta utilización y cuidado, pudiendo así salvar vidas y disminuir posibles lesiones.

Si se tiene una condición de funcionamiento normal, las protecciones van a actuar en los tiempos adecuados. Si no es así, las mismas van a abrir en un tiempo mayor, y como la energía incidente del arco eléctrico es directamente proporcional al tiempo, si transcurre más tiempo hasta la eliminación del arco por acción de la protección, se va a tener mayor energía incidente. Esto determina que los operarios deban utilizar EPP más robustos, pesados e incómodos, lo que podría generar situaciones peligrosas debido a la menor libertad de movimiento. Por lo que realizar un correcto estudio de coordinación y selectividad de las protecciones para luego desarrollar la posterior evaluación de riesgo arco eléctrico es fundamental.

En esta práctica, las evaluaciones de riesgo de arco eléctrico fueron llevadas a cabo utilizando el programa informático, aplicando la norma IEEE 1584 – 2002/2004a. Las mismas fueron realizadas para dos corrientes de falla de arco, ya que como lo menciona la norma, se requirió que se determine un tiempo de funcionamiento de la protección, tanto para la corriente de arco esperada como para la corriente de arco reducida. Luego se calculó la energía incidente para ambas corrientes de arco y la mayor energía incidente se tomó como resultado para posicionarse en la peor condición. La corriente de arco reducida es considerada por la norma un 15% menor de la corriente de arco esperada. A forma de visualización en la figura 30 se muestran ambas corrientes para la

configuración 1, la corriente de arco esperada en línea azul y la reducida en línea negra.

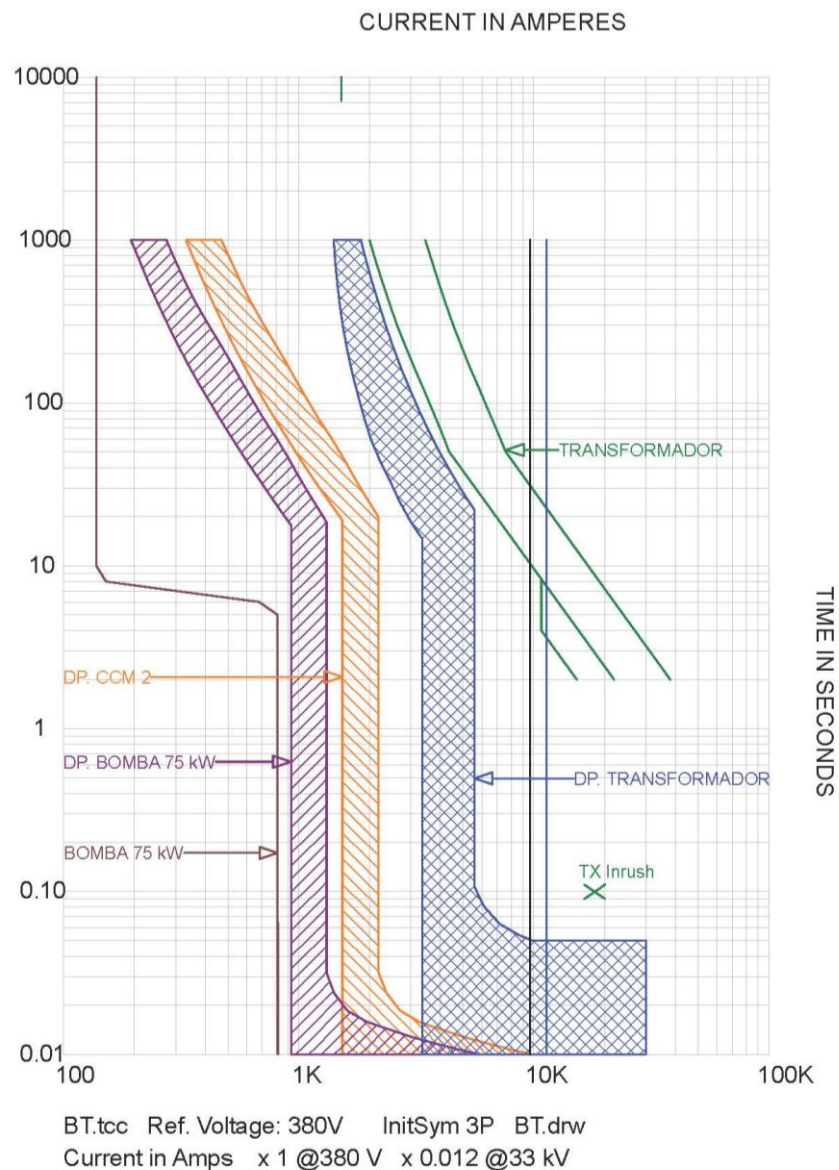


Figura 30. Corrientes de arco en la configuración 1.

A continuación, se presentan capturas de pantalla de como el programa informático, SKM Power Tools, muestra los valores de energía incidente calculados para cada configuración y que parámetros utilizó para la respectiva evaluación. En cada una de ellas se encuentra encerrada la energía incidente en la barra del TGBT.

Configuración 1

En esta configuración, el valor de mayor energía resultó de 2,3 cal/cm² en la barra del TGBT y se obtuvo con la corriente de arco esperada, 11,35 kA, en un tiempo de actuación de la protección de 50 ms. Se muestran más parámetros de la evaluación en la figura 31.

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (m)	Working Distance (m)	Incident Energy (cal/cm ²)	Required Protective FR Clothing Category
CCM 2	DP. CCM 2	0.38	29.80	13.48	28.59	12.93	0.01	0.000	Yes	PNL	25	0.255	0.457	0.46	Category 0
TGBT	DP. TRANSFORMADOR	0.38	29.97	13.54	25.11	11.35	0.05	0.000	Yes	PNL	25	0.682	0.457	2.3	Category 1
TMT 1	DP. TMT 1	33.00	6.17	6.17	0.05	0.05	0.1	0.000	Yes	SWG	153	13.156	0.914	247	Dangerous! (*N11) (*N2) (*N9)
TMT 2	DP. TMT 1	33.00	5.87	5.87	5.83	5.83	0.028	0.000	Yes	SWG	153	1.515	0.914	3.3	Category 1 (*N11)

Figura 31. Evaluación de riesgo de arco eléctrico para la configuración 1.

Configuración 2

En esta configuración nuevamente se obtuvo la mayor energía, 2,4 cal/cm², mediante la corriente de arco esperada, 11,35 kA, pero con un tiempo de actuación mayor, de 53 ms. Se muestran más parámetros de la evaluación en la figura 32.

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (m)	Working Distance (m)	Incident Energy (cal/cm ²)	Required Protective FR Clothing Category
CCM 2	DP. CCM 2	0.38	29.80	13.48	28.59	12.93	0.01	0.000	Yes	PNL	25	0.255	0.457	0.46	Category 0
TGBT	DP. TRANSFORMADOR	0.38	29.97	13.54	25.11	11.35	0.053	0.000	Yes	PNL	25	0.703	0.457	2.4	Category 1
TMT 1	DP. TMT 1	33.00	6.17	6.17	0.05	0.05	0.1	0.000	Yes	SWG	153	13.156	0.914	247	Dangerous! (*N11) (*N2) (*N9)
TMT 2	DP. TMT 1	33.00	5.87	5.87	5.83	5.83	0.028	0.000	Yes	SWG	153	1.515	0.914	3.3	Category 1 (*N11)

Figura 32. Evaluación de riesgo de arco eléctrico para la configuración 2.

Configuración 3

En esta configuración se obtuvo la mayor energía incidente, 2,8 cal/cm², pero en esta situación mediante la corriente de arco reducida, 9,65 kA, con un tiempo de actuación de la protección de 73 ms. Esta configuración nos permite observar que no siempre la corriente de arco esperada es la que producirá la mayor energía incidente. Se muestran más parámetros de la evaluación en la figura 33.

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (m)	Working Distance (m)	Incident Energy (cal/cm ²)	Required Protective FR Clothing Category
CCM 2	DP. CCM 2	0.38	29.80	13.48	28.59	12.93	0.01	0.000	Yes	PNL	25	0.255	0.457	0.46	Category 0
TGBT	DP. TRANSFORMADOR	0.38	29.97	11.51	25.11	9.65	0.073	0.000	Yes	PNL	25	0.772	0.457	2.8	Category 1 (*N3)
TMT 1	DP. TMT 1	33.00	6.17	6.17	0.05	0.05	0.1	0.000	Yes	SWG	153	13.156	0.914	247	Dangerous! (*N11) (*N2) (*N9)
TMT 2	DP. TMT 1	33.00	5.87	5.87	5.83	5.83	0.028	0.000	Yes	SWG	153	1.515	0.914	3.3	Category 1 (*N11)

Figura 33. Evaluación de riesgo de arco eléctrico para la configuración 3.

Configuración 4

Como ya se mencionó, esta configuración se llevó a cabo para ejemplificar las consecuencias de la realización de una inadecuada configuración en las protecciones. En los resultados mostrados en la figura 34 se puede observar que la mayor energía incidente, 67 cal/cm², fue obtenida con la corriente de arco reducida, 9,65 kA, en un tiempo mayor a los 2 s, que por condiciones en las especificaciones del estudio se determinó como tiempo máximo de actuación. Estos tiempos superiores son el resultado de la inadecuada configuración de la protección, lo cual ocasionó que frente a la corriente de arco la protección actuara en la zona de disparo térmico y no en la zona de disparo magnético, es decir, no actuó en la zona instantánea donde los tiempos son muy inferiores.

Bus Name	Protective Device Name	Bus kV	Bus Bolted Fault (kA)	Bus Arcing Fault (kA)	Prot Dev Bolted Fault (kA)	Prot Dev Arcing Fault (kA)	Trip/ Delay Time (sec.)	Breaker Opening Time (sec.)	Ground	Equip Type	Gap (mm)	Arc Flash Boundary (m)	Working Distance (m)	Incident Energy (cal/cm ²)	Required Protective FR Clothing Category
CCM 2	DP. CCM 2	0.38	29.80	13.48	28.59	12.93	0.01	0.000	Yes	PNL	25	0.255	0.457	0.46	Category 0
TGBT	DP. TRANSFORMADOR	0.38	29.97	11.51	25.11	9.65	2	0.000	Yes	PNL	25	5.314	0.457	67	Dangerous! (*N3) (*N9)
TMT 1	DP. TMT 1	33.00	6.17	6.17	0.05	0.05	0.1	0.000	Yes	SWG	153	13.156	0.914	247	Dangerous! (*N11) (*N2) (*N9)
TMT 2	DP. TMT 1	33.00	5.87	5.87	5.83	5.83	0.028	0.000	Yes	SWG	153	1.515	0.914	3.3	Category 1 (*N11)

Figura 34. Evaluación de riesgo de arco eléctrico para la configuración 4.

2.2.6. Cálculos y Etiquetas

A continuación, se adjuntan las tablas con los resultados de los cálculos realizados en las diferentes configuraciones y las etiquetas correspondientes que deberían adosarse a los tableros de la instalación. (Figuras 35 a 42)

Configuración 1

Barra	Parámetro	Valores
TGBT	Protección	DP. Transformador
	Tensión	380 V
	Corriente de Arco	11,35 kA
	Tiempo de Apertura	0,05 s
	Límite de Protección contra Arco	0,682 m
	Distancia de Trabajo	0,457 m
	Energía Incidente	2,3 cal/cm ²
	Categoría EPP	1

Figura 35. Resultados de los cálculos de evaluación de arco eléctrico, configuración 1.

ADVERTENCIA

Peligro de Arco y Choque Eléctrico

Obligatorio el Uso de EPP Apropriado

Tensión Nominal del Sistema 380 V (CA) Energía Incidente 2,3 cal/cm ² Frontera de Límite de Aproximación 1,067 m Límite de Protección Contra Arco 0,682 m Límite de Aproximación Restringida 0,305 m Límite de Aproximación Prohibida 0,025 m Guantes Categoría 00	<div style="border: 2px solid black; border-radius: 15px; background-color: yellow; padding: 10px; display: inline-block;"> 2,3 cal/cm² a 0,457 m </div>
--	--

EPP Obligatorio: Categoría 1 (4 cal/cm²)

- Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco
- Gafas de seguridad (SR)
- Protección facial a prueba de arco o capucha de traje a prueba de arco
- Protección auditiva (tipo tapón)
- Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP)
- Guantes de cuero para trabajo pesado
- Casco de seguridad
- Zapatos de seguridad (OP)

Identificación de Equipo: TGBT **Ubicación: Edificio Principal**
Fecha de Evaluación de Arco Eléctrico: 03/03/2021

Figura 36. Etiqueta de arco eléctrico, configuración 1.

Configuración 2

Barra	Parámetro	Valores
TGBT	Protección	DP. Transformador
	Tensión	380 V
	Corriente de Arco	11,35 kA
	Tiempo de Apertura	0,053 s
	Límite de Protección contra Arco	0,703 m
	Distancia de Trabajo	0,457 m
	Energía Incidente	2,4 cal/cm ²
	Categoría EPP	1

Figura 37. Resultados de los cálculos de evaluación de arco eléctrico, configuración 2.

ADVERTENCIA

Peligro de Arco y Choque Eléctrico

Obligatorio el Uso de EPP Apropriado

Tensión Nominal del Sistema	380 V (CA)	2,4 cal/cm² a 0,457 m
Energía Incidente	2,4 cal/cm ²	
Frontera de Límite de Aproximación	1,067 m	
Límite de Protección Contra Arco	0,703 m	
Límite de Aproximación Restringida	0,305 m	
Límite de Aproximación Prohibida	0,025 m	
Guantes Categoría	00	

EPP Obligatorio: Categoría 1 (4 cal/cm²)

- Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco
- Gafas de seguridad (SR)
- Protección facial a prueba de arco o capucha de traje a prueba de arco
- Protección auditiva (tipo tapón)
- Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP)
- Guantes de cuero para trabajo pesado
- Casco de seguridad
- Zapatos de seguridad (OP)

Identificación de Equipo: TGBT **Ubicación: Edificio Principal**
Fecha de Evaluación de Arco Eléctrico: 03/03/2021

Figura 38. Etiqueta arco eléctrico, configuración 2.

Configuración 3

Barra	Parámetro	Valores
TGBT	Protección	DP. Transformador
	Tensión	380 V
	Corriente de Arco	9,65 kA
	Tiempo de Apertura	0,073 s
	Límite de Protección contra Arco	0,772 m
	Distancia de Trabajo	0,457 m
	Energía Incidente	2,8 cal/cm ²
	Categoría EPP	1

Figura 39. Resultados de los cálculos de evaluación de arco eléctrico, configuración 3.

ADVERTENCIA

Peligro de Arco y Choque Eléctrico

Obligatorio el Uso de EPP Apropriado

Tensión Nominal del Sistema	380 V (CA)	2,8 cal/cm² a 0,457 m
Energía Incidente	2,8 cal/cm ²	
Frontera de Límite de Aproximación	1,067 m	
Límite de Protección Contra Arco	0,772 m	
Límite de Aproximación Restringida	0,305 m	
Límite de Aproximación Prohibida	0,025 m	
Guantes Categoría	00	

EPP Obligatorio: Categoría 1 (4 cal/cm²)

- Camisa manga larga y pantalón a prueba de arco u overol a prueba de arco
- Gafas de seguridad (SR)
- Protección facial a prueba de arco o capucha de traje a prueba de arco
- Protección auditiva (tipo tapón)
- Casaca, casacón, ropa impermeable o forro de casco a prueba de arco (OP)
- Guantes de cuero para trabajo pesado
- Casco de seguridad
- Zapatos de seguridad (OP)

Identificación de Equipo: TGBT **Ubicación: Edificio Principal**

Fecha de Evaluación de Arco Eléctrico: 03/03/2021

Figura 40. Etiqueta arco eléctrico, configuración 3.

Configuración 4

Barra	Parámetro	Valores
TGBT	Protección	DP. Transformador
	Tensión	380 V
	Corriente de Arco	9,65 kA
	Tiempo de Apertura	2 s
	Límite de Protección contra Arco	5,314 m
	Distancia de Trabajo	0,457 m
	Energía Incidente	67 cal/cm ²
	Categoría EPP	FN

Figura 41. Resultados de los cálculos de evaluación de arco eléctrico, configuración 4. FN: energía incidente superior a los valores estipulados por la NFPA 70E de 40 cal/cm².



PELIGRO



Peligro de Arco y Choque Eléctrico

Prohibido el Trabajo Energizado



Tensión Nominal del Sistema	380 V (CA)	<div style="background-color: red; color: black; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p style="font-size: 24px; font-weight: bold;">67</p> <p style="font-size: 18px; font-weight: bold;">cal/cm²</p> <p style="font-size: 18px; font-weight: bold;">a 0,457 m</p> </div>
Energía Incidente	67 cal/cm ²	
Frontera de Límite de Aproximación	1,067 m	
Límite de Protección Contra Arco	5,314 m	
Límite de Aproximación Restringida	0,305 m	
Límite de Aproximación Prohibida	0,025 m	
Guantes Categoría	00	

No Existe EPP Seguro

Excede la Capacidad Máxima de EPP para Arco Eléctrico

Prohibido desarrollar Trabajos con el Equipo Energizado

Identificación de Equipo: TGBT Ubicación: Edificio Principal

Fecha de Evaluación de Arco Eléctrico: 03/03/2021

Figura 42. Etiqueta arco eléctrico, configuración 4.

2.2.7. Elementos de Protección Personal

Como se describió en el apartado de los EPP del primer capítulo, existe una clasificación de los EPP asociada a un valor de energía que deben ser capaz de resistir como mínimo. En relación a los resultados obtenidos en la evaluación de riesgo de arco eléctrico para las diferentes configuraciones, se detallan las categorías de EPP a utilizar.

Configuración 1,2 y 3

Bajo estas configuraciones de las protecciones, es necesaria una categoría 1 de EPP. En base a lo descrito, se seleccionó un traje de dicha categoría para que el operario realice las actividades reduciendo al máximo los posibles riesgos de arco eléctrico. En las figuras 43 y 44 se muestran EPP categoría 1 que cumple con estas configuraciones y se describen sus principales características.



Figura 43. EPP categoría 1. Fuente: Catálogo SIBILLE SAFE.

Características Generales	
Categoría	1
Nivel Mínimo de Protección Requerido	4 cal/cm ²
Norma	NFPA 70E
Aplicación	Operador de subestaciones, inspectores de mantenimiento de cables, operarios de transformadores, operarios en plantas eléctricas, técnicos en mantenimiento.
Contenido del Equipo	Casco de electricista blanco. Gafas de seguridad monocristal, contra los infrarrojos y anti UV. Pasamontañas ignifugo. Chaqueta de electricista, ignifuga, antiestática. Pantalón electricista, ignifugo, antiestático. Guantes de látex aislantes BT clase 00, 360 mm de longitud. Cubreguantes de cuero. Botas de seguridad, sin elementos metálicos. Bolsa de transporte del equipo Arc Flash.

Figura 44. Características generales EPP Categoría 1.

Configuración 4

La normativa aplicada por el programa informático utilizado en esta práctica no contempla equipamiento de protección personal para niveles de energía superiores a los límites establecidos por ésta. La norma NFPA 70E establece un máximo de 40 cal/cm² para los EPP que pueden usarse para intervenir equipos eléctricos energizados. Aunque en el mercado existe EPP que soporta niveles de energía incidente mayor que 40 cal/cm², la norma recomienda prohibir el trabajo en equipos o tableros energizados con tales niveles de energía incidente.

Este valor de energía incidente en la práctica analizada surgió de una configuración inadecuada de la protección aguas abajo del transformador, lo cual podría solucionarse simplemente corrigiendo esta configuración. Pero es posible obtener energías incidentes de magnitudes mayores a 40 cal/cm² en otras situaciones, aún con una correcta configuración de protecciones. Cuando esto suceda se recomienda implementar alguna mejora tecnológica que permita disminuir la energía incidente.

2.3. CONCLUSIONES

La aparamenta de baja tensión de una instalación eléctrica es la que se encuentra más expuesta a la intervención directa de los operarios, con diversos objetivos, y por lo tanto donde se encuentra el mayor interés en llevar a cabo la evaluación de riesgo de arco eléctrico.

Dada la naturaleza intensa y destructiva de este fenómeno, se concluye que al poseer una única sala de BT en la instalación estudiada fue necesario analizar la barra donde se obtendría la mayor corriente de cortocircuito, la TGBT en este caso, aunque el operario manipulará con más frecuencia la barra de los centros de control de motores, CCM.

Determinar la categoría de los EPP para la mayor corriente de cortocircuito proporciona que el operario, al entrar a la sala, siempre se encuentre protegido, sin tener que diferenciar distintos EPP para distintos tableros, lo que podría en llevar a equivocaciones, colocando al o a los operarios en situaciones de riesgo innecesarias.

En relación a los resultados arrojados en la evaluación de arco eléctrico para la instalación de BT y considerando que la configuración 1 fue la establecida como natural de la instalación evaluada, siendo el EPP necesario determinado, se recomienda la implementación de vestimenta a prueba de arco de categoría 1 como vestimenta de uso diario.

La relación entre energía incidente, tiempo de actuación, elementos de protección personal y demás parámetros no siempre es lineal, y un mismo razonamiento no será capaz de extenderse a distintas aplicaciones. Es decir, para cada instalación se deberá realizar un análisis particular de las ventajas y desventajas, considerando las consecuencias de cada configuración seleccionada. En este análisis es necesario hacer foco en los siguientes factores:

✓ **Configuración de Protecciones**

Este parámetro es un factor fundamental en la determinación de la energía incidente en la instalación. Se puede tener una energía mayor o menor según el paradigma utilizado. Como la corriente de cortocircuito la establece la instalación, el tiempo total en que la protección actúa y despeja la falla es el único parámetro posible de modificar para disminuir la energía incidente. Esta disminución del tiempo se puede lograr modificando la curva de los dispositivos de protección o cambiando los mismos o equipando la instalación con nuevas tecnologías.

✓ **Tiempo de Actuación de Protecciones**

Cuanto mayor sea el tiempo de actuación de una protección, en el caso que se suscite una falla de arco eléctrico, aumentara en forma

considerable la energía incidente de la instalación. Muchas veces este parámetro no es variable y proviene por defecto de las protecciones utilizadas, debiendo ser parte del análisis. La utilización de nuevas tecnologías permite disminuir estos tiempos.

✓ **Elementos de Protección Personal**

Es importante conocer las características técnicas de los elementos seleccionados. Por ejemplo, al seleccionar una categoría mayor de EPP, podrá suponerse una mayor protección, lo cual refiriéndose a cuestiones netamente técnicas es cierto, ya que si se requiere una protección hasta 4 cal/cm² y se utiliza una de 8 cal/cm² el operario tendría una mayor protección contra arco eléctrico, pero no hay que dejar de lado la importancia del aspecto operativo. Una categoría mayor de EPP implica no solo mayor protección, sino también un mayor peso de la indumentaria, aumentando la incomodidad para realizar las actividades laborales, lo que puede traer aparejado no solo demoras sino también obstáculos para realizar las mismas en forma adecuada.

Estos factores que fueron explicados en forma detallada con sus respectivas consecuencias, se encuentran íntimamente interrelacionados por lo que suele resultar inviable modificar alguno sin alterar los demás, por lo que se recomienda analizarlos en su conjunto.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE BENEFICIOS

Las inversiones realizadas en la industria no siempre permiten realizar un análisis sobre los beneficios económico que estas serán capaces de generar en los años venideros. Es decir, los desembolsos de dinero por parte de las empresas no siempre se ven reflejados en aumento de ganancias en el tiempo. La situación que se describe es muy usual, fundamentalmente en dos temas que en la actualidad toman una importancia relevante, como lo son la seguridad de los trabajadores y las cuestiones ambientales.

Estas inversiones que no apuntan en forma directa a acrecentar las ganancias, sino que tienen otros objetivos principales, surgen a partir de la creciente demanda en la aplicación de normas que regulen aspectos de seguridad laboral, y la obligatoriedad de estas normas que los distintos gobiernos del mundo comenzaron a implementar. Lo que en un principio no significa ningún aumento de ganancias de forma directa, en forma indirecta resultan en un ahorro considerable respecto a multas y penalizaciones en lo que se refiere a no trabajar bajo norma.

Con todo lo explicado en los párrafos anteriores surge la necesidad de calificar los beneficios de las inversiones realizadas, por lo que surge el concepto conocido como matriz de riesgo (risk matrix, en inglés).

Una matriz de riesgo es una herramienta de control y de gestión, normalmente utilizada para identificar las actividades (procesos y productos) más importantes de una empresa, el tipo y nivel de riesgos inherentes a estas actividades y los factores exógenos y endógenos relacionados con estos riesgos (factores de riesgo).

3.1. Análisis del Riesgo

El “riesgo” es una combinación de probabilidades y de la gravedad de la posible lesión, mientras que el “peligro” es una posible fuente de lesión y “peligroso” es aquello que resulta en la exposición a al menos un peligro. Un peligro en instalaciones eléctricas es esencialmente la electricidad, pero podemos tener también peligros secundarios como, por ejemplo, las alturas, el confinamiento, las temperaturas elevadas, entre otros.

Para hacer un análisis de riesgo se deben identificar estos mismos, estimar la gravedad de la posible lesión, estimar la probabilidad de que ocurra la lesión, determinar si es posible evitarlo con los controles actuales en la instalación y determinar si se requieren medidas de protección y/o controles. Para llevar a cabo la estimación inicial del riesgo, se relaciona en forma directa la gravedad

del daño y la probabilidad. Para determinar esta probabilidad se deben tener en cuenta:

1. La suma de la frecuencia y duración de la exposición de las personas al riesgo.
2. La probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso, la cual se puede ver en las estadísticas de accidentabilidad o haciéndolo en referencia a la evaluación o auditoria que pudiera tener el sistema y ver así que nivel de preparación traen los operarios.
3. La posibilidad de evitar o limitar las heridas o daños a la salud, de acuerdo a los controles que ya se tengan implementados.

El resultado es un número, con el cual se va a la figura 39. Algunos resultados tienen más de un escenario, uno más probable con resultado de severidad de lesión menor, es decir, con menor cal/cm² y otros con menos probabilidades, pero con mayor severidad en la lesión, es decir, con más cal/cm². Si el resultado de la ecuación es mayor a 25 los resultados serían catastróficos.

	Gravedad de la Lesión (Consecuencias)				
Probabilidad de Ocurrencia en el Período	Ligera	Menor	Media	Crítica	Catastrófica
cal/cm ²	Menor a 1.2	Entre 1.2 y 8		Entre 8 y 40	Mayor a 40
Improbable	1	2	3	4	5
Raramente	2	4	6	8	10
Ocasionalmente	3	6	9	12	15
Probable	4	8	12	16	20
Definitivo	5	10	15	20	25
<u>Referencias</u>					
<ul style="list-style-type: none"> - Bajo: entre 1 y 3 - Moderado: entre 4 y 8 - Alto: entre 9 y 12 - Extremo: entre 15 y 25 					

Figura 45. Consecuencias de las lesiones.

CAPÍTULO 4 POSIBLES MEJORAS

Hay tres factores predominantes que explican la magnitud del arco eléctrico: la distancia, el tiempo y la corriente. La distancia es la separación que hay entre el foco del arco y el operario, el tiempo es aquel que tarda el arco en iniciarse y extinguirse, y la corriente es un factor intrínseco del sistema eléctrico en el punto de la falla.

Como ya se mencionó una de las maneras de bajar la energía incidente es realizar un estudio de coordinación y selectividad de las protecciones con el objetivo de disminuir los tiempos de eliminación del arco, pero no siempre es posible acortar estos tiempos, por lo que existen otras medidas de prevención y protección. Estas medidas se pueden diferenciar en dos categorías: las que intentan disminuir la energía del arco y las que intentan aumentar la distancia del trabajador a la fuente del arco. Determinar en una instalación que medidas son propicias también va a depender si se aplican medidas en origen y de protección colectiva o medidas de prevención individuales.

A continuación, serán desarrolladas algunas de estas propuestas.

4.1. Disminución de la Energía

Los tableros con dispositivos limitadores de arco tienen como objetivo limitar los efectos destructivos del arco interno, una vez que este ya haya sido generado, garantizando la resistencia del tablero al mismo, protegiendo a los operarios y a la instalación. Ciertos dispositivos descritos a continuación utilizan detectores de arco y detectores de sobrepresión para limitar estos efectos.

Los detectores de arco consisten en instalar en el interior de los tableros dispositivos que detectan el flujo luminoso asociado a fenómenos del arco eléctrico y envían una señal al interruptor en 1-2 ms, tiempos bastantes más rápidos que los del interruptor. Este proceso reemplaza la intervención del relé de sobreintensidad del interruptor que podría verse por ejemplo retardado por cuestiones de selectividad.

En cambio, los detectores de sobrepresión consisten en instalar en el interior de los tableros dispositivos que, como su nombre lo indica, detectan la onda de sobrepresión que se genera por el fenómeno del arco eléctrico. Estos con un retardo de 10-15 ms, son capaces de detectar el pico de presión y enviar una señal al interruptor de alimentación que produce su actuación, sin esperar los tiempos propios de intervención de las protecciones selectivas, necesariamente más largos.

Los sistemas de este tipo actúan directamente sobre la bobina de apertura del interruptor de alimentación, por lo que no es necesario dispositivos electrónicos de procesamiento.

4.1.1. Interruptores de Baja Tensión para Mantenimiento

Un interruptor de mantenimiento es un interruptor conectado a un tablero de distribución de baja tensión, que es accionado antes de que un operario realice un trabajo en un tablero en particular, que no puede ser desenergizado. Una vez activado, el ajuste de disparo instantáneo del interruptor cambia a un valor más bajo (pero preprogramado) reduciendo así el nivel de energía.

Una cosa a tener en cuenta con estos interruptores, es que se necesitan dos etiquetas de arco, una para cuando el sistema está en modo regular y otra para cuando está en modo de mantenimiento.

El sistema utiliza un circuito de disparo independiente, que proporciona tiempos de interrupción y procesamiento de señales más rápidos que la protección estándar. La función se activa directamente en el interruptor a través de una conexión local o de forma remota a través de comunicaciones o una entrada de contacto. Esto mejora las operaciones de mantenimiento al reducir los tiempos de apertura de fallos y la energía en caso de arco.

Este tipo de interruptores está pensado para variar sus parámetros nominales, ante una tarea de mantenimiento reduciendo así los posibles riesgos tanto de electrocución como de quemaduras por arco eléctrico del operario en cuestión. En la figura 46 se muestran ejemplos de interruptores de mantenimiento.



Figura 46. Interruptores de mantenimiento Eaton IZMX16 e IZMX40. Fuente: Eaton.

En la figura 47 se observan las curvas corriente-tiempo del interruptor en cuestión. En condiciones de funcionamiento normal, la curva del mismo es la de color rojo para la cual se requiere EPP categoría 3. Ahora bien, en operación de mantenimiento, se configura dicho interruptor en forma temporal en la curva azul, reduciendo de esta forma la energía incidente y por lo tanto la categoría de EPP cambia a 1, lo que indica menores riesgos para el operario.

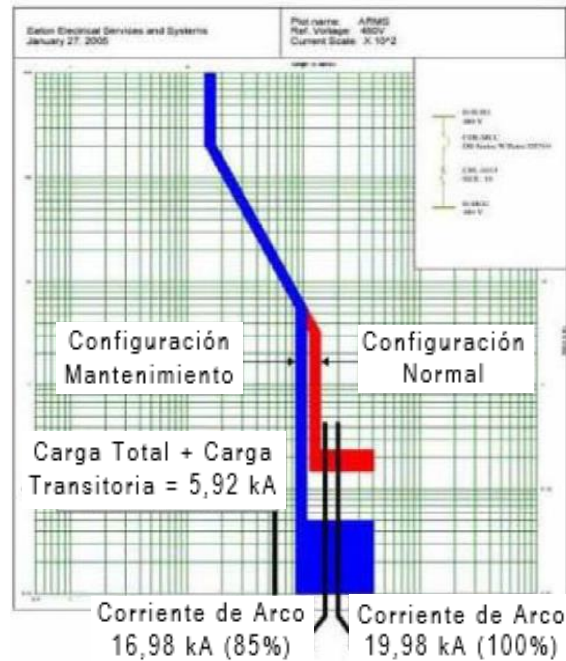


Figura 47: Variación de curvas de selectividad de interruptor de mantenimiento. Fuente: Eaton.

En el cuadro de la figura 48 se muestra el efecto de esta mejora sobre la energía incidente durante una falla, asociado a las curvas de la figura 47, donde la corriente de falla de contacto es de 40 kA y la energía incidente disminuye de 10,7 cal/cm² a 2,2 cal/cm², una reducción aproximada de 80 % cuando se emplea el interruptor de mantenimiento.

Interruptor de Mantenimiento	Corriente de Falla de Contacto [kA]	Corriente de falla de Arco [kA]	Tiempo de Actuación [ms]	Energía Incidente [cal/cm ²]
Inactivo	40	19,98	240	10,7
Activo	40	19,98	50	2,23

Figura 48. Cambios en la energía incidente utilizando interruptor de mantenimiento. Fuente Eaton.

4.1.2. Protección con Detectores de Arco Eléctrico

Existen protecciones de panel contra arco eléctrico que cuentan con detectores de arco tanto en BT como en MT. Dependiendo de la necesidad existen diferentes modelos:

- Con sensores puntuales.
- Con sensores de fibra óptica.
- Con sensores de corriente y sensores puntuales.
- Con sensores de corriente y sensores de fibra óptica.

En todos los modelos se incluyen detectores lumínicos, ya que su objetivo es realizar un rápido disparo de la protección mediante la detección de la luminosidad creada por el arco. Esta detección de arco eléctrico se produce en menos de 2 ms y si a su vez se le adiciona un sistema de extinción de arco, equipo descrito posteriormente, se puede extinguir la falla en menos de 5 ms.

Estos dispositivos de protección tienen como ventaja la posibilidad de incorporarse a instalaciones ya existentes y a su vez suelen incluir la opción de indicar el estado de la protección o si la fibra está cortada, como también la posibilidad de comunicarse con otras protecciones.

Sensores Puntuales

Son sensores lumínicos que cuentan con un detector óptico con una amplitud de 180°, que ante la detección de un resplandor envían una señal a la protección. Los tiempos de respuesta suelen ser de 1 ms para la detección de la luz y 2 ms para que la señal de disparo de la protección ocurra. Se conectan fácilmente utilizando un cable mallado. Un modelo de estos sensores se muestra a la izquierda de la figura 49.

Sensores Puntuales que incorporan Sensores de Presión

La incorporación de los sensores de presión a los detectores ópticos tiene como objetivo ser redundantes a la detección lumínica. Se los suele usar en casos donde no es posible la detección por medio de medición de la corriente. Su funcionamiento se basa en detectar en simultaneo una presión y un resplandor, siendo esta la situación por la cual se enviará una orden de disparo. Un modelo de estos sensores se muestra a la derecha de la figura 49.



Figura 49. Sensores puntuales. Fuente: Arcteq.

Sensores de Fibra Óptica

Estos sensores son una fibra con un emisor y un receptor, sobre la misma se emite una señal de verificación y si a lo largo de esta se detecta un resplandor, la protección va a emitir la orden de disparo. Poseen una amplitud de detección de 360° y su instalación de estos debe ser cuidadosa, ya que una luminosidad externa podría generar un falso disparo. Se las suele encontrar de hasta 60 m, de diferentes radios de curvaturas y de diferentes temperaturas de tolerancia (-40 a 125°C). En la figura 50 se muestra un sensor de fibra óptica.



Figura 50. Sensor de fibra óptica. Fuente: Arcteq.

Sensores de Medición de Corriente y Luminosidad

Estos dispositivos utilizan dos métodos de detección para evitar falsos disparos. Estos dispositivos son más grandes y completos, ya que incorporan el censado de las corrientes de las 3 fases como una corriente diferencial, utilizando transformadores de intensidad diferenciales.

Sistemas de Extinción de Arco

Este dispositivo es complementario a las protecciones con detectores de arco eléctrico y permite reducir aún más los tiempos de actuación de las protecciones, llegando a tiempos inferiores a los 5 ms. Su funcionamiento se basa en generar un camino de baja impedancia para la corriente de falla durante la apertura del interruptor. Incorporar estos equipos permite reducir la categoría de los EPP que utilizan los operarios de una instalación a categoría 1. Es posible encontrar en el mercado de hasta 1.000 kA en BT.

En funcionamiento normal, el sistema se encuentra en la posición que no genera un camino conductor. En el instante que la protección detecta la falla, ésta le da la orden de actuación a este sistema, que en 2 ms pasa a generar un camino conductor de baja impedancia. En paralelo a este sistema, el interruptor de alimentación comienza a abrir. En ese tiempo el sistema ya va a haber operado, entonces por él va a pasar la corriente de cortocircuito en vez de pasar por donde va a estar la falla. Durante los 50 ms hasta la actuación del interruptor, el sistema va a tener que tolerar la corriente de cortocircuito.

4.1.3. Interruptores de Puesta a Tierra Ultra Rápidos en Media Tensión

El sistema que incorpora interruptores de puesta a tierra ultra rápidos detecta el arco eléctrico interno en un tablero en un mínimo tiempo, utilizando sensores ópticos, iniciando una acción a un nivel más alto del que el sistema de protección existente actúa, extinguiendo rápidamente la falla. Como ya se ha mencionado el tiempo de extinción de la falla está directamente relacionado con los daños ocasionados por un arco eléctrico.

Este tipo de sistemas están compuestos por un dispositivo electrónico y su correspondiente elemento primario de conmutación, el cual inicia un cortocircuito trifásico a tierra en caso de que ocurra una falla. Este elemento primario posee un tiempo de conmutación menor a 1,5 ms que, junto con rápida y fiable detección de la falla, logra extinguir el arco eléctrico en menos de 5 ms desde su detección.

Al ser este cortocircuito de impedancia considerablemente más bajo que la falla, hace que la corriente de cortocircuito del arco se conmute inmediatamente al interruptor de puesta a tierra ultra rápido, haciendo que la tensión del arco baje y que el arco se extinga casi inmediatamente. El flujo controlado resultante de la corriente de falla a tierra es apagado por el interruptor del alimentador.

En la figura 51 se muestra que, una vez que el dispositivo electrónico en conjunto con el sensor óptico detecta la falla, emiten una señal hacia a la unidad de disparo que a su vez envía una señal al interruptor de puesta a tierra ultra rápido, que realiza la extinción inmediata del arco para que por último se deje de alimentar la falla conmutando el interruptor aguas arriba.

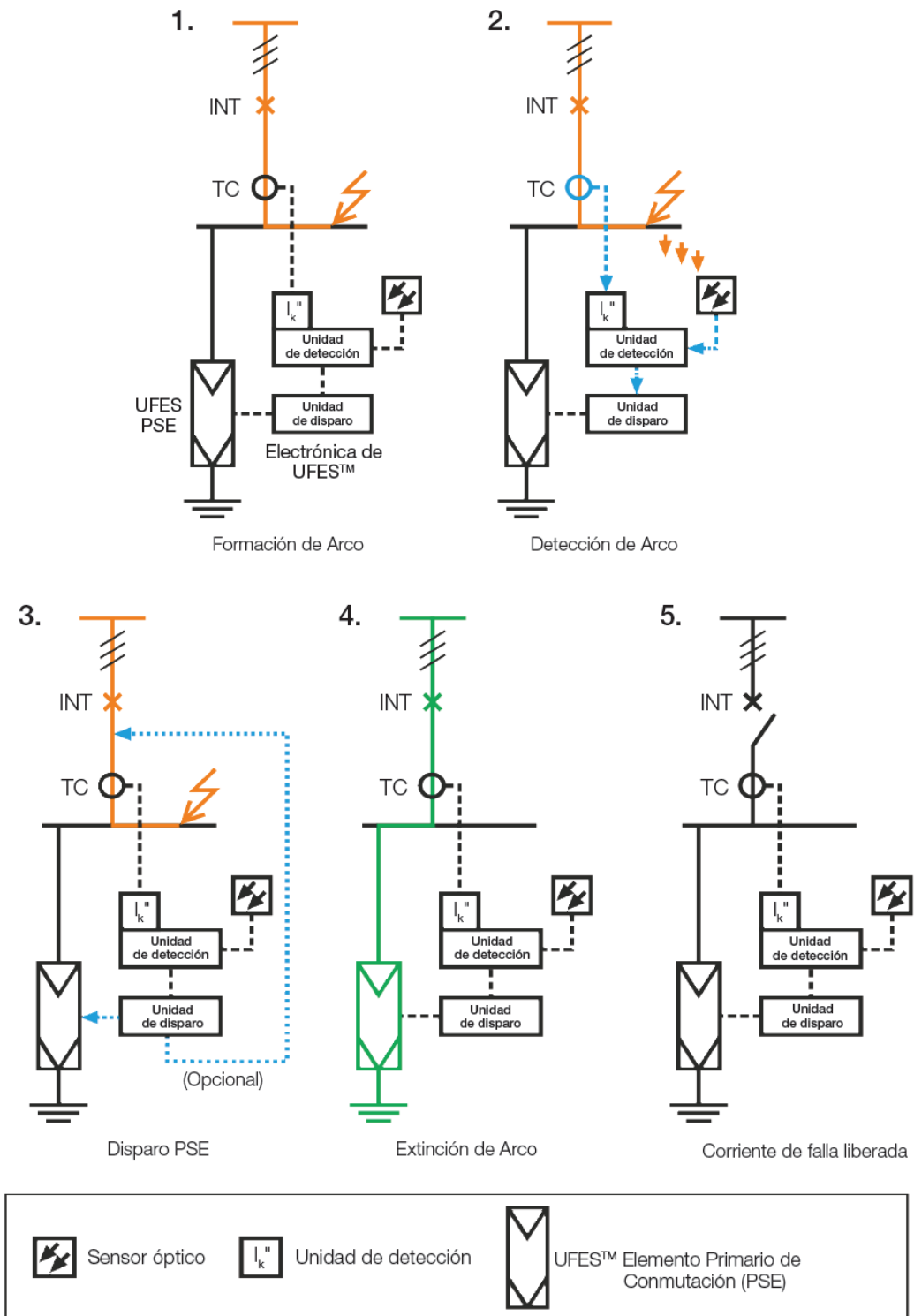


Figura 51. Secuencia de sucesos. Fuente: ABB

Ejemplo de Aplicación

En las figuras 52 y 53 se pueden ver los daños ocasionados por un arco eléctrico cuando no se utiliza un interruptor de puesta a tierra ultra rápido y cuando si se utiliza.



Figura 52. Sin protección de interruptor de puesta a tierra ultra rápido. Fuente: ABB



Figura 53. Con protección de interruptor de puesta a tierra ultra rápido. Fuente: ABB

4.1.4. Tableros de Baja Tensión Resistentes a Arcos Internos

Son tableros que, debido a su construcción, son capaces de limitar el arco y la sucesiva salida de gases. Cuentan con estructuras metálicas reforzadas para resistir las sobrepresiones ocasionadas por un arco en su interior y un recorrido interno, similar a una chimenea, para evacuar los gases a alta temperatura producidos por el arco.

En primer lugar, se busca evitar la apertura accidental de las puertas o perforaciones como consecuencia de la onda de presión generada por el arco interno. En segundo lugar, pero no menos importante, los instrumentos instalados en las puertas de los mismos deben soportar estas sobrepresiones internas, sin ser expulsados ni proyectados fuera de la misma.

Las consecuencias térmicas del arco pueden reducirse diseñando el interior de los tableros para que la salida de los mismos se produzca por encima de la parte más alta de los tableros, superior a los 2 metros, donde ya no resultan ser peligrosas para el operario.

Una vez ocurrido el arco, el tablero debe permitir una operación segura de la instalación y no permitir que el arco se propague entre dos columnas adyacentes o entre la zona de las barras y la zona donde están instalados los componentes. En algunas ocasiones se realizan subdivisiones internas a prueba de arco o compartimientos donde el arco quede confinado evitando que se dañen las zonas adyacentes.



Figura 54. CCM Schneider Electric Modelo 6 Resistente al Arco. Fuente: Schneider Electric.

En la figura 54 se presenta un CCM resistente al arco, como se describió previamente, exhibe las siguientes características:

- **Mejor ventilación de las unidades**

Respiraderos que dirigen la falla de arco entre la unidad y la chimenea que se encuentra en la parte trasera, transfiriendo la presión de gases y el calor. Estos se pueden observar en la figura 55.



Figura 55. Respiradores de CCM Schneider Electric Modelo 6 Resistente al Arco. Fuente: Schneider Electric.

- **Diseño más robusto y estación de control de placa metálica (CSP)**
El acero de 2,66 mm de espesor (calibre 12) reduce la deformación de la CSP estando montada en la puerta con tuercas y tornillos, en lugar de estar articulada a la unidad creando una junta entre la puerta y la CSP. Impide que el CSP mostrado en la figura 56 se separe de la puerta al recibir una sobrepresión ocasionada por un arco interno.



Figura 56. CSP de CCM Schneider Electric Modelo 6 Resistente al Arco. Fuente: Schneider Electric.

- **Liberación controlada del gas ionizado**
Cámaras opcionales como se puede observar en la figura 57, permitirán la liberación de los gases y el gas ionizado (plasma) producido por el arco hacia arriba, llevando la energía peligrosa al techo donde es liberada la presión del arco eléctrico fuera del CCM.



Figura 57. Cámaras opcionales de CCM Schneider Electric Modelo 6 Resistente al Arco. Fuente: Schneider Electric.

También es posible encontrar tableros de MT resistentes al arco eléctricos.

4.2. Aumento de la Distancia

Que el operario se encuentre a una distancia superior al límite de protección contra arco garantiza que la energía incidente será inferior a $1,2 \text{ cal/cm}^2$. La aplicación de alguna medida que aumente esta distancia no cambiara el valor de energía incidente que se encuentra indicado en la etiqueta.

4.2.1. Sistemas Remoto de Inserción y Extracción de Interruptores

Uno de los trabajos más riesgosos a los que se ve expuesto un operario es la inserción o extracción de un interruptor de forma manual. Es por este motivo que se han diseñado sistemas que reemplazan esa tarea para poder realizar de forma remota.

Estos sistemas están diseñados para interruptores de BT y MT, se encuentran constituidos por un carro automatizado, el cual es posicionado por el operador fácilmente frente al tablero del interruptor a maniobrar, para posteriormente poder trasladarse a una distancia segura de hasta 90 m, donde enviará mediante un control remoto, la señal de insertar o extraer. De esta manera se logra proteger al operador del riesgo de arco eléctrico y choque eléctrico que se genera al efectuar este tipo de tareas.

Para monitorear la operación, el sistema está provisto de una cámara montada en la parte frontal del carro, mostrando en tiempo real lo que sucede durante la maniobra.

El sistema es compatible con todos los tipos de interruptores de los principales fabricantes que cuentan con mecanismo de inserción y extracción de tipo rotativo o embolo. Se puede utilizar el mismo carro para distintos interruptores, solo es necesario diferentes accesorios para cada interruptor. Puede operar con interruptores extraíbles con extinción por aire, aceite, SF6 y de vacío con operación de inserción y extracción tanto horizontal como vertical.

En la figura 58 se muestran ejemplos comerciales de estos sistemas, mostrándose uno de ellos en acción en la figura 59.



Figura 58. Sistema remoto de inserción y extracción de interruptores marca CBS. De izquierda a derecha: RRS-1, RRS-1 LT y RRS-4. Fuente: CBS ArcSafe



Figura 59. Sistema remoto de inserción y extracción de interruptores marca CBS en acción.
Fuente: FONKEL MEXICANA.

4.2.2. Interruptores con Operación Remota

Interruptores con conectividad inalámbrica son una de las posibilidades para mejorar la seguridad del operario ante choque eléctrico y arco eléctrico, permitiendo operar en forma remota la instalación como se muestra en la figura 60, a una distancia superior a la del límite de protección contra arco.



Figura 60. Operación de interruptor Schneider Electric MasterPact MTZ con conectividad inalámbrica por afuera del límite de protección contra arco por medio del smartphone.
Fuente: Schneider Electric.

Estos interruptores gracias a su tecnología permiten la supervisión en tiempo real para un mantenimiento eficaz, alertando mediante alarmas en forma remota o permitiendo ver los ajustes de la protección a través de un smartphone y una conexión inalámbrica, incluso con el suministro eléctrico interrumpido. Por otra parte, permite actualizarse mediante módulos digitales sin interrumpir el servicio.

PROPUESTA A FUTUROS DESAFÍOS

Realizar la comparación entre los métodos de protección tradicionales, como los empleados en el presente proyecto, y las nuevas tecnologías existentes, ya sea las detalladas en Arcade el capítulo 4 u otras que se consideren adecuadas. Justificar la elección realizada en base a aspectos técnicos, operativos y económicos.

ANEXOS

Anexo 1 – Ensayo de Elementos de Protección Personal

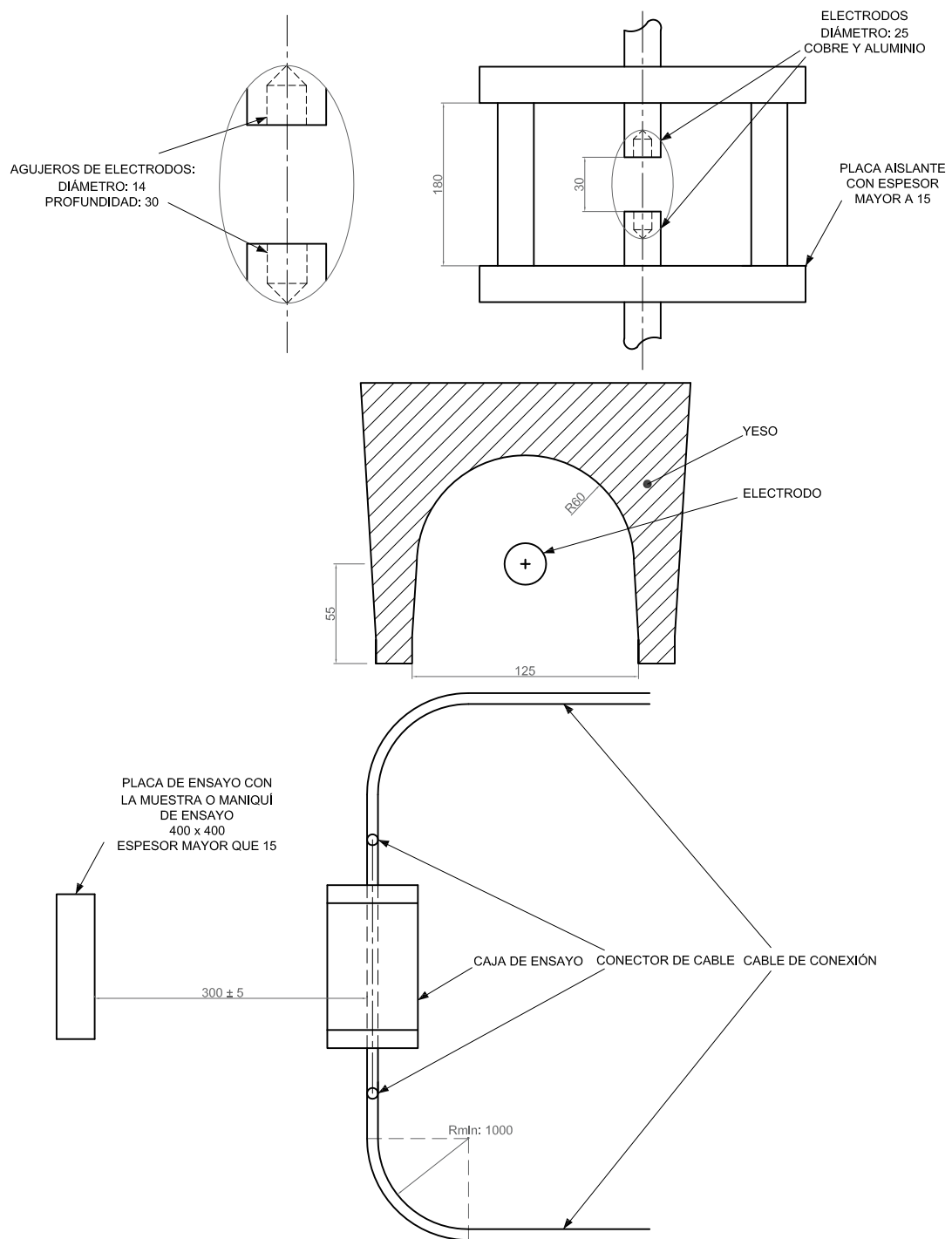
Anexo 2-A – Esquema Unifilar Simplificado

Anexo 2-B – Esquema Unifilar Tablero General de Baja Tensión

Anexo 2-C – Esquema Unifilar de Cargas y Transformador

Anexo 2-D – Esquema Unifilar con Corrientes Nominales

Anexo 2-E – Esquema Unifilar con Corrientes de Cortocircuito



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Delta

Ensayo de Elementos de Protección Personal

Dibujó: Cerisola G. - Venaglia Y.

Unidades: mm

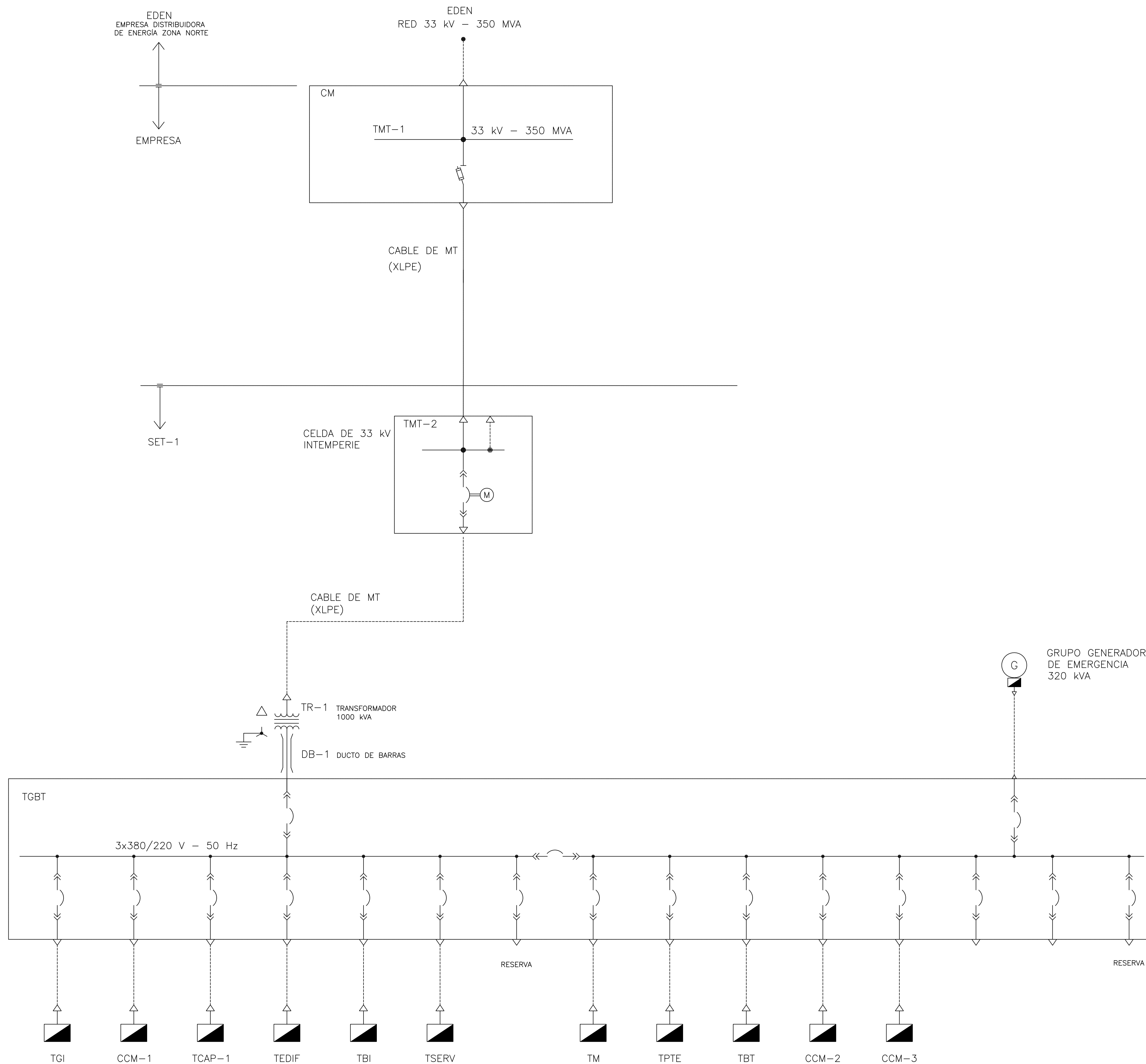
Aprobó: Ing. Vena S.

Escala: S/E

Anexo: 1

Página 88 de 97

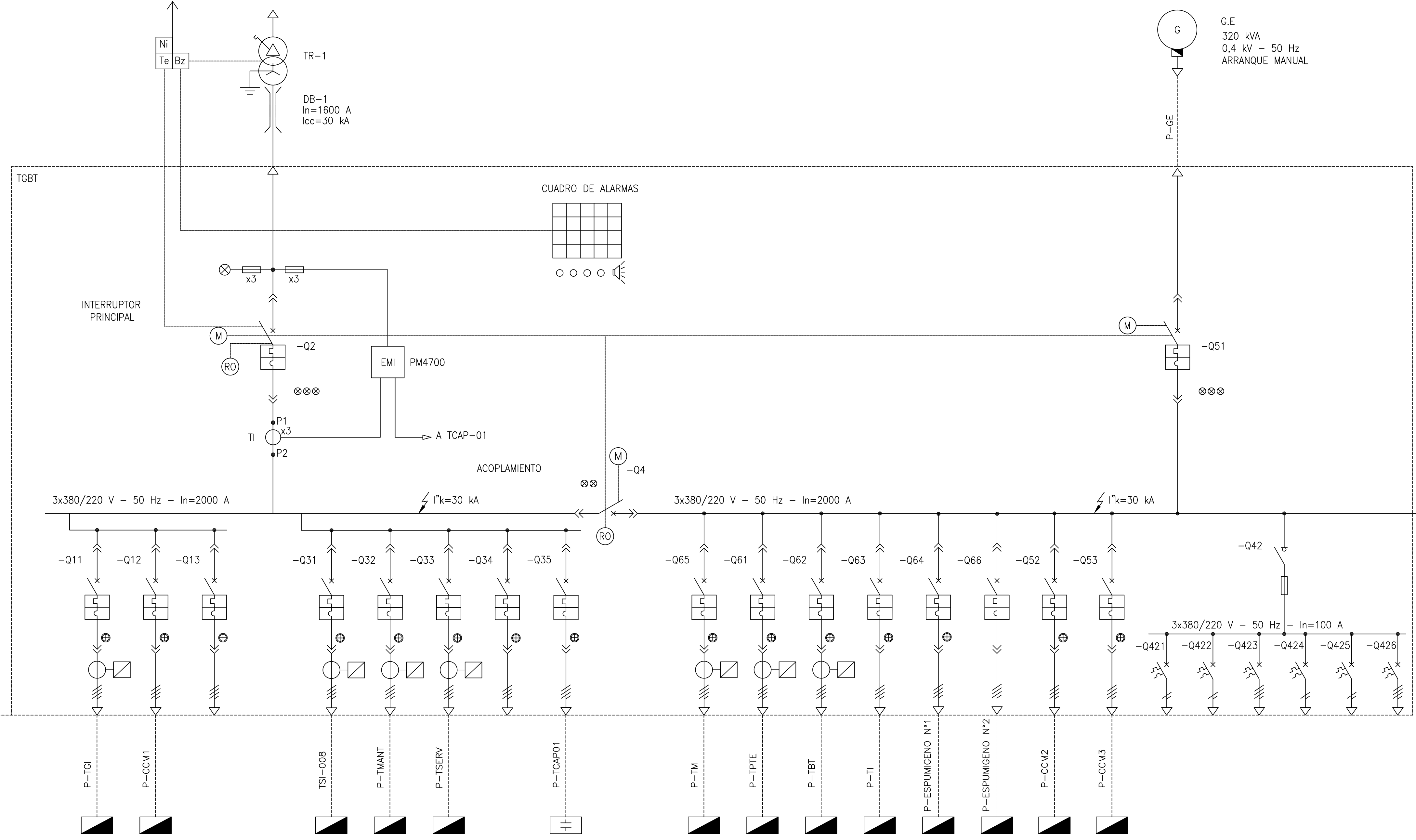




ABREVIATURAS:

- CCM-1 : TABLERO CENTRO CONTROL DE MOTORES N° 1
- CCM-2 : TABLERO CENTRO CONTROL DE MOTORES N° 2
- CCM-3 : TABLERO CENTRO CONTROL DE MOTORES N° 3
- CM : CABINA DE MEDICIÓN
- DB-1 : DUCTO DE BARRAS N° 1
- TBI : TABLERO BOMBAS DE INCENDIO
- TBT : TABLERO BOMBA TORNILLO
- TCAP-1 : BANCO DE CAPACITORES N° 1
- TEDIF : TABLERO EDIFICIO ADMINISTRATIVO
- TGBT : TABLERO GENERAL DE BAJA TENSIÓN
- TGI : TABLERO GENERAL DE ILUMINACIÓN
- TM : TABLERO DE MUELLE
- TMT-1 : TABLERO MEDIA TENSIÓN N° 1
- TMT-2 : CELDA INTEMPERIE MEDIA TENSIÓN N° 2
- TPTE : TABLERO PLANTA TRATAMIENTO DE EFLUENTES
- TR-1 : TRANSFORMADOR DE POTENCIA N° 1
- TSERV : TABLERO DE SERVICIOS





G.E.
320 kVA
0,4 kV - 50 Hz
ARRANQUE MANUAL

CUADRO DE ALARMAS

INTERRUPTOR PRINCIPAL

EMI PM4700

ACOPLAMIENTO

3x380/220 V - 50 Hz - In=2000 A

3x380/220 V - 50 Hz - In=2000 A

3x380/220 V - 50 Hz - In=100 A

DESTINO	TABLERO GENERAL DE ILUMINACIÓN	CCM 1 BAY 1,2,3,4,5	RESERVA EQUIPADA	ENTRADA TRAF0	TSIO08	TMANT TABLERO DE MANTENI_MIENTO	TSERV TABLERO DE SERVICIOS	RESERVA EQUIPADA	TCAP-01 TABLERO DE CAPACITORES
UBICACIÓN	S.E.T. 1	S.E.T. 1		S.E.T. 1 PLAYA	S.E.T. 1	TALLER DE MANTEN.	SALA DE MAQUINAS		S.E.T. 1
POTENCIA (kW)	147	88			20	12	56		255 kWAr

TM TABLERO DE MUELLE	TPTE TABLERO PLANTA DE EFLUENTES	TBT TABLERO BOMBA TORNILLO	TI TABLERO DE INSTR.	ESPUMIGENO N°1	ESPUMIGENO N°2	CCM 2 BAY 6,7,8,9,10	CCM 3 BAY 11 + FUT.	SERVICIOS AUXILIARES						
								RESERVA EQUIPADA	CALEFAC. CELDAS M.T.	ALIM. C.A GRUPO	RESERVA EQUIP.	TCC EQUIP.	CABINA M.T	
MUELLE	PLANTA DE EFLUENTES		S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1	S.E.T. 1		
32	20	20				112	88							

NOTAS:

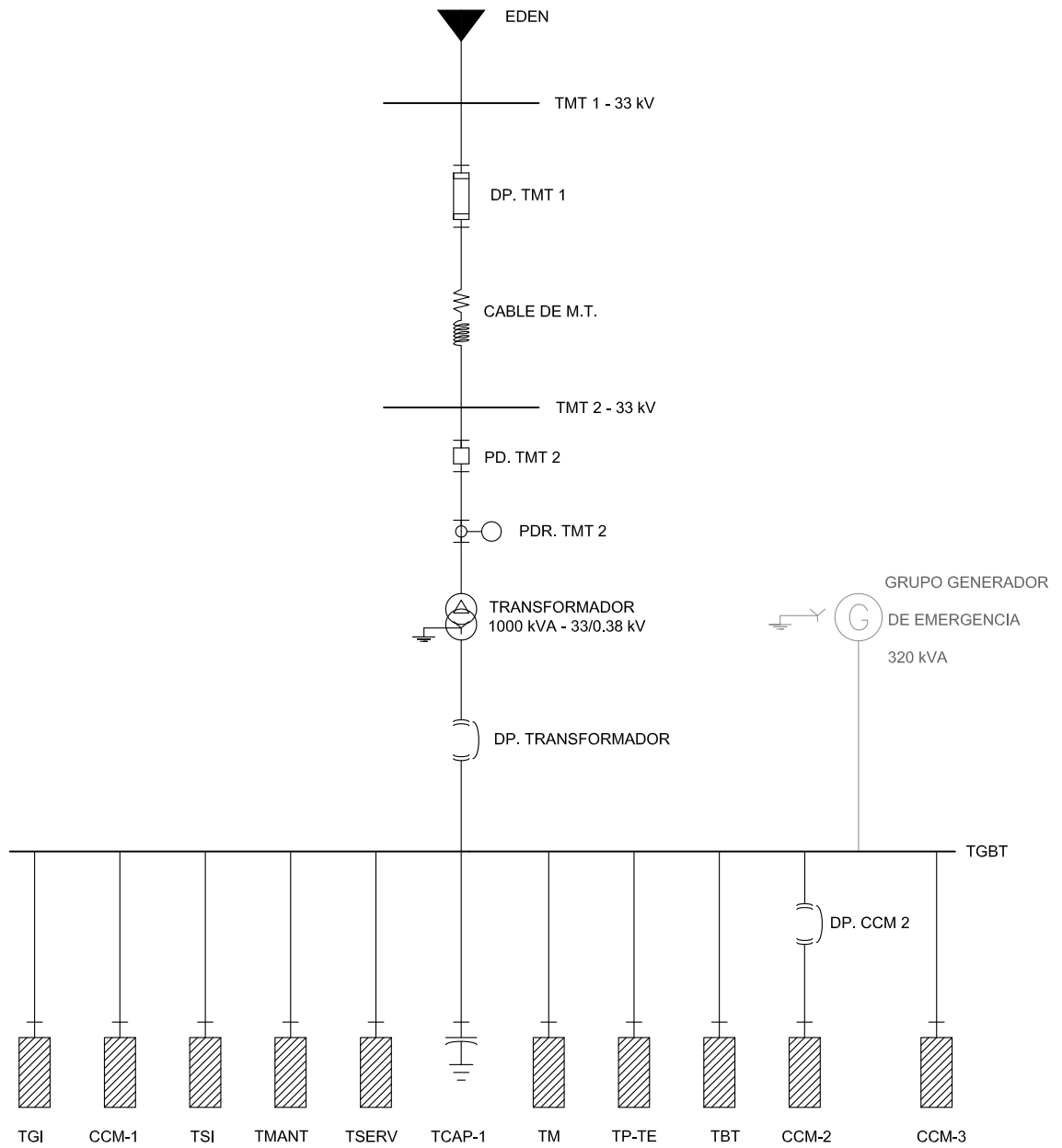
- LA TENSION AUXILIAR DE COMANDO, SEÑALIZACIÓN, ALARMA Y PROTECCIÓN SERÁ DE 110 Vcc.
- LA ENTRADA Y SALIDA DE CABLES AL TGBT ES POR LA PARTE SUPERIOR.
- TENSIONES DE COMANDO Y SEÑALIZACIÓN:
 - ILUMINACIÓN INTERIOR CELDAS : 220 Vcc 50 Hz
 - RESISTENCIAS CALEFACTORES : 220 Vcc 50 Hz
 - MOTORES ACCIONAMIENTO INTERRUPTORES : 110 Vcc ALIMENTACIÓN EXTERNA
 - BOBINAS DE APERTURA : 110 Vcc ALIMENTACIÓN EXTERNA
 - ALARMAS Y SEÑALIZACIÓN : 110 Vcc ALIMENTACIÓN EXTERNA
- LEYENDAS EN CUADRO DE ALARMAS:
 - 1 - TR1 ALARMA TEMPERATURA
 - 2 - TR1 ALARMA NIVEL ACEITE
 - 3 - TR1 ALARMA BUCHHOLZ
 - 4 - TR1 DISPARO TEMPERATURA
 - 5 - TR1 DISPARO NIVEL ACEITE
 - 6 - TR1 DISPARO BUCHHOLZ
 - 7 - FALTA UN COMANDO
 - 8 - FALTA CARGADOR BATERIAS
 - 9 - INT. INT-1 ABIERTO POR PROTECCIÓN
 - 10- INT. Q2 ABIERTO POR PROTECCIÓN
 - 11- INT. Q5 ABIERTO POR PROTECCIÓN
 - 12- FALTA EN GRUPO ELECTROGENO
 - 13- FALTA EN CORRECTOR DE FACTOR POT.
 - 14- FALTA EN BOMBAS INCENDIO
 - 15- RESERVA
 - 16- RESERVA
 - 17- RESERVA

REFERENCIAS:

- TGBT TABLERO GENERAL BAJA TENSION.
 GE GRUPO ELECTROGENO.
 TI TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD.
 EMI EQUIPO MEDICIÓN INTEGRAL ELECTRÓNICO CON SALIDA DE COMUNICACIÓN RS485 CON MEDICIÓN DE LOS SIGUIENTES PARÁMETROS: U(volts), I(A), P(kW), Q(kVAR), COSφ, F(Hz) kWh, kVARh, DEMANDA MÁXIMA.
 INDICACIÓN: INT. CERRADO (ROJO), INT. ABIERTO (VERDE)
 FALTA (ÁMBAR).
 BOBINA DE APERTURA
 COMANDO MOTORIZADO
 INDICACIÓN DE ACTUACIÓN POR FALTA (ÁMBAR)
 INDICACIÓN DE FASES ENERGIZADAS (ROJO)

Esquema Unifilar Tablero General de Baja Tensión

Dibujó: Cerisola G. - Venaglia Y.	Unidades: S/U	
Aprobó: Ing. Vena S.	Escala: S/E	
Anexo: 2 - B	Página 90 de 97	



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Delta

Esquema Unifilar de Cargas y Transformador

Dibujó: Cerisola G. - Venaglia Y.

Unidades: S/U

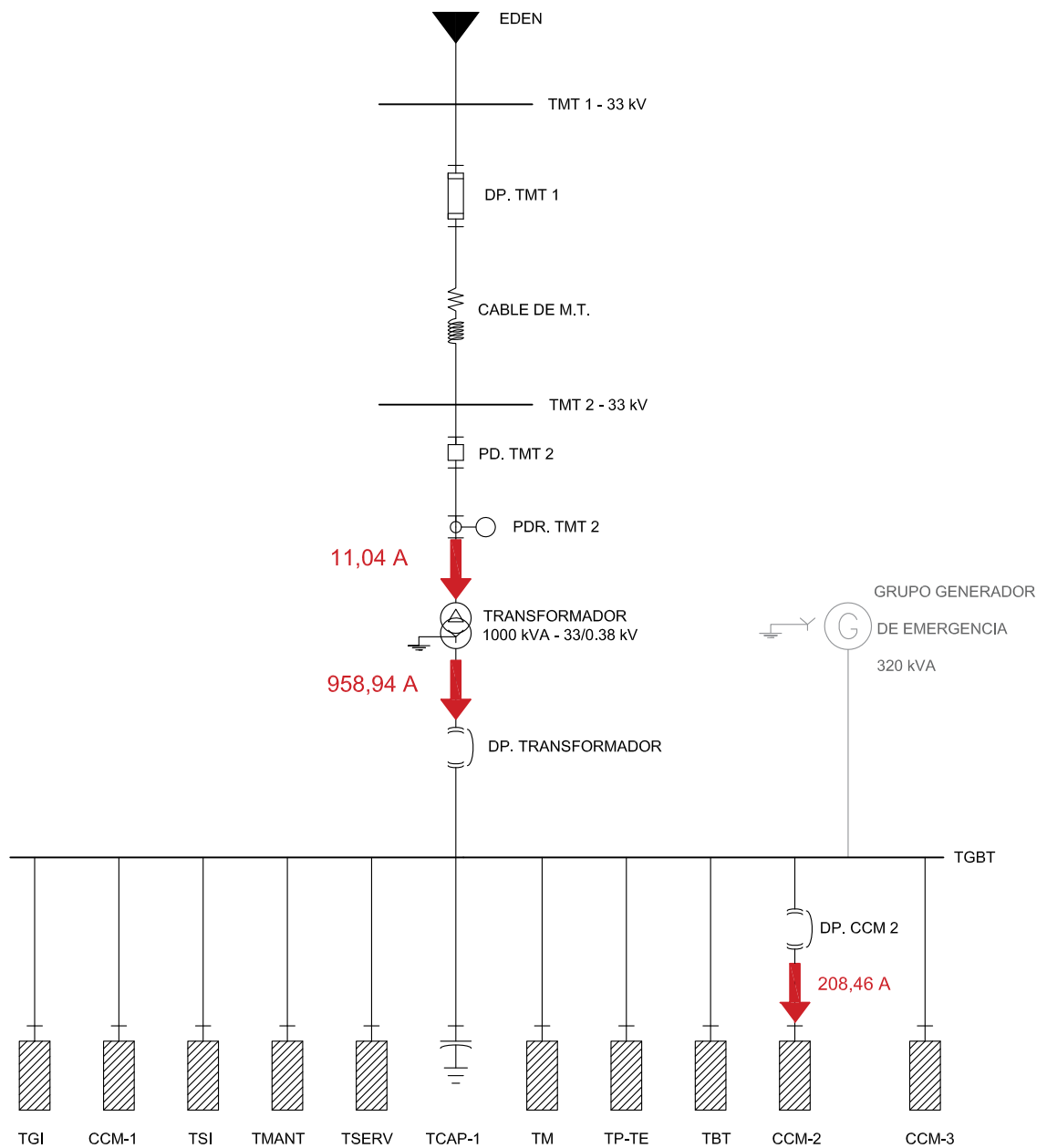
Aprobó: Ing. Vena S.

Escala: S/E

Anexo: 2 - C

Página 91 de 97





Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Delta

Esquema Unifilar con Corrientes Nominales

Dibujó: Cerisola G. - Venaglia Y.

Unidades: S/U

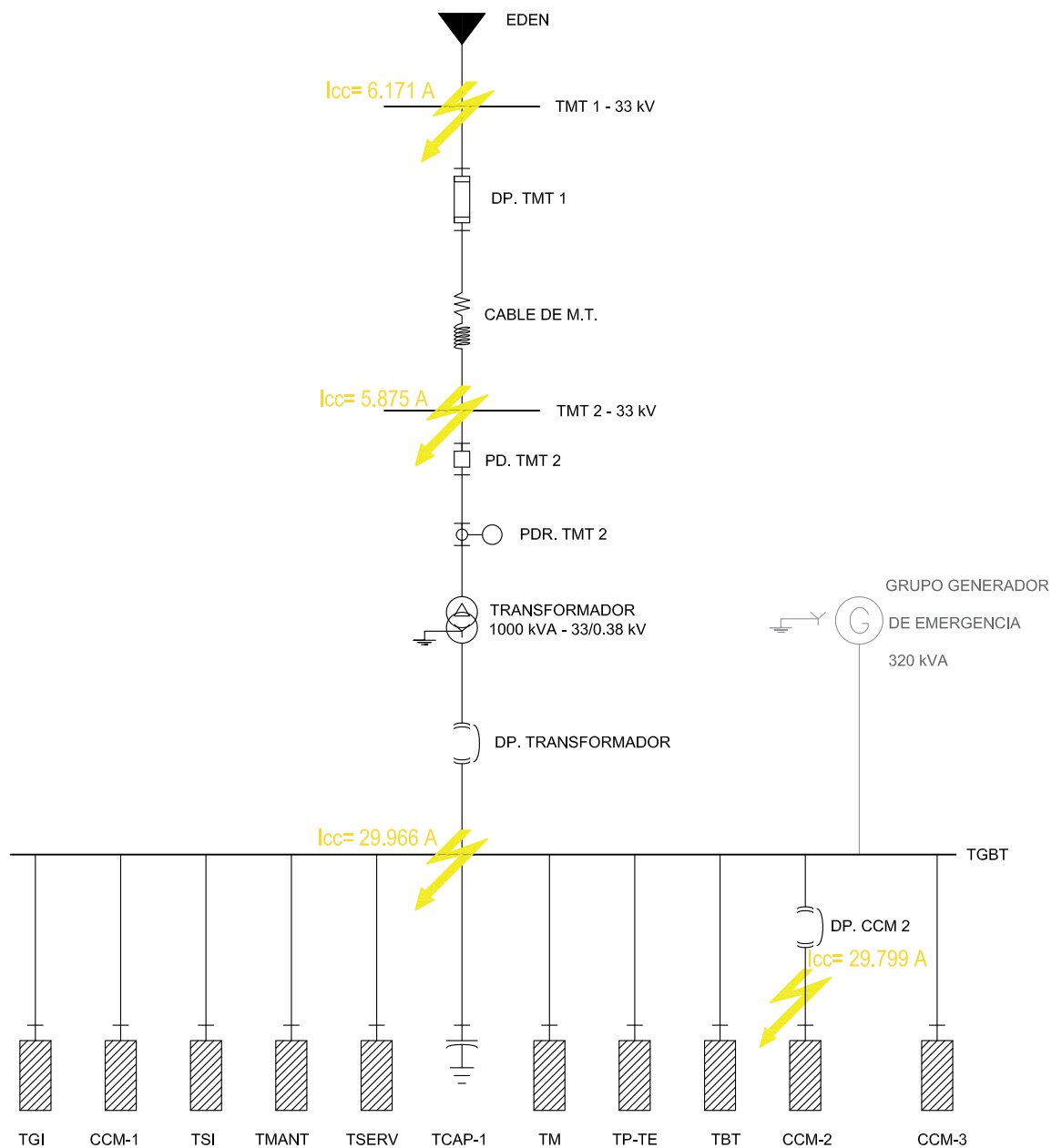
Aprobó: Ing. Vena S.

Escala: S/E

Anexo: 2 - D

Página 92 de 97





Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Delta

Esquema Unifilar con Corrientes de Cortocircuito

Dibujó: Cerisola G. - Venaglia Y.

Unidades: S/U

Aprobó: Ing. Vena S.

Escala: S/E

Anexo: 2 - E

Página 93 de 97



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CESE. Conoce el NFPA 70 Código Eléctrico Nacional.
<<https://ceseconsultores.com/codigo-electrico-nacional/>>
2. Espinosa Rütter, Gustavo M. NFPA 70E Ed. 2018. Estándar de Seguridad Eléctrica. 2020.
<<https://www.youtube.com/watch?v=zGgR5emHZJc>>
3. Instituto Argentino de Seguridad. Sistema I.A.S. para la Prevención de Accidentes. Modelo de Organización y Gestión para la "Seguridad Total". 2018.
<<http://www.ias.org.ar/wp-content/uploads/2018/11/sistema-ias-para-la-prevencion-de-accidentes.pdf>>
4. Wikipedia. ASTM International.
<https://en.wikipedia.org/wiki/ASTM_International>
5. Wikipedia. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Instituto_Argentino_de_Normalizaci%C3%B3n_y_Certificaci%C3%B3n>
6. International Electrotechnical Commission.
<<https://www.iec.ch/>>
7. Wikipedia. Comisión Electrotécnica Internacional.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Comisi%C3%B3n_Electrot%C3%A9cnica_Internacional>
8. National Fire Protection Association. NFPA 70. Código Eléctrico Nacional. 2008.
9. National Fire Protection Association. NFPA 70. National Electrical Code. 2017.
10. National Fire Protection Association. NFPA 70E. Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo. 2004.
11. National Fire Protection Association. NFPA 70E. Standard for Electrical Safety in the Workplace. 2015.

12. National Fire Protection Association. NFPA 70E. Standard for Electrical Safety in the Workplace. 2018.
13. National Fire Protection Association. NFPA 70B. Hoja de Datos. 2020. <<https://www.nfpajla.org/images/NFPA70B-Hoja-de-Datos.pdf>>
14. Wikipedia. NFPA 70B. <https://en.wikipedia.org/wiki/NFPA_70B>
15. National Fire Protection Association. NFPA 70B. Práctica Recomendada para el Mantenimiento de Equipos Eléctricos. 2016.
16. Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. 2002.
17. Lee, Ralph H. The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. 1982.
18. Doughty, Richard L.; Neal, Thomas E.; Floyd, H. Landis. Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution Systems. 2000.
19. Ramírez Cano, Francisco J.; Rivas Paternina, Fredy A. Metodología para el Diagnóstico del Nivel de Riesgo por Arco Eléctrico en Subestaciones de Transmisión de Energía. 2011. [http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/65dc1a0b0b6949078325792d0045a828/\\$FILE/07_MetodologiaParaElDiagnostico.pdf](http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/65dc1a0b0b6949078325792d0045a828/$FILE/07_MetodologiaParaElDiagnostico.pdf)>
20. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Delta. Apuntes Cátedra Seguridad y Riesgo Eléctrico. 2017.
21. Pérez Formigó, Marcos. Arco Eléctrico: Estimación de la Energía Calorífica Incidente sobre un Trabajador. 2011.
22. Loaiza Morales, Paola A. Marco Comparativo entre la Norma IEEE 1584 y la Norma NFPA 70E. 2018.
23. Ferro, Jarbas. Técnicas Avanzadas de Selectividad. Sistemas más Seguros, Confiables y con menor Costo. 2018. <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/colombia-ecuador-docs/coordinaci%C3%B3n-de-protecciones.pdf?sfvrsn=3293a614_2>

24. Dias, Ricardo; Arrojo, Carlos D.; Nastta, Hernán A.; Herlein, Matías E.; Scaramutti, José C.; Danessa, Franco. Ensayo de Protección contra Arco Eléctrico. 2018.
<<https://megavattios.com.ar/ensayo-de-proteccion-contr-arco-electrico/>>
25. Marina Textil. ATPV vs EBT: La Mejor Protección ante el Arco Eléctrico. 2013.
<<https://marinatextil.com/es/news/clasificacion-atpv-ebt-proteccion-arco-electrico/>>
26. Red Kap. ATPV y EBT en Prendas FR: Te Explicamos las Diferencias. 2018.
<<https://www.redkap.com.mx/blog/atpv-y-ebt-en-prendas-fr-te-explicamos-las-diferencias/>>
27. American Society for Testing and Materials. ASTM F1506-20a. Standard Performance Specification for Flame Resistant and Electric Arc Rated Protective Clothing Worn by Workers Exposed to Flames and Electric Arcs. 2020.
28. ABB. UFES. Switch de Puesta a Tierra Ultra Rápido. 2015.
29. Lorentson, Callie. A Brief History of Arc Flash. 2016.
<<https://www.powerstudies.com/blog/brief-history-arc-flash-part-one>>
30. Schneider Electric. Centro Control de Motores Modelo 6 Arc Resistant. 2013.
31. Schneider Electric. Tablero de Fuerza Masterclad para Interiores con Revestimiento Metálico y Resistencia al Arco de 5–15 kV. 2018.
32. ABB. Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N°7. Cuadros de Baja Tensión Resistentes a los Arco Internos.
33. Schneider Electric. MasterPact MTZ Operation Assistant. 2019.
<https://www.youtube.com/watch?v=_FBcXkpGTB0>
34. Fonkel Mexicana. Sistema Remoto para Inserción y Extracción de Interruptores con Mecanismo de Operación Tipo Rotativo, Marca CBS, Modelo RRS-1. <<https://www.fonkel.com.mx/detalleproducto.php?id=889>>
35. Berberian, Edgardo. Modernización en Sistemas de Media Tensión y Seguridad de Activos. 2016.

-
36. Virginia Tech. Approach Boundaries.
<[https://www.ehss.vt.edu/programs/ELE_boundaries.php#:~:text=The%20Limited%20Approach%20Boundary%20\(LAB\)%20is%20the%20approach%20distance%20to,approach%20limit%20for%20unqualified%20persons](https://www.ehss.vt.edu/programs/ELE_boundaries.php#:~:text=The%20Limited%20Approach%20Boundary%20(LAB)%20is%20the%20approach%20distance%20to,approach%20limit%20for%20unqualified%20persons)>
 37. Ricagno, Tomás. Protecciones Arc Flash. 2020.
<<https://www.youtube.com/watch?v=EIZKrZG9fes>>
 38. Obreron. <<https://oberoncompany.com/>>
 39. Pérez Ross, Fernando. Arc Flash, cuando el Equipo de Protección Personal es Insuficiente.
<<https://radthink.com.mx/arc-flash-cuando-el-equipo-de-proteccion-personal-es-insuficiente/>>
 40. Travis, Jon. How to Reduce Arc Flash Incident Energy.
<<https://www.leafelectricalsafety.com/blog/how-to-reduce-arc-flash-incident-energy>>
 41. Eaton. Resistente al Arco.
<<http://www.eaton.com.ar/conosur/ProductosSoluciones/Energia/ProductosyServicios/DistribucionEI%C3%A9ctrica/CeldasSwitchgearenMediaTension/MetalClad/ResistentealArco/index.htm>>