

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**ANÁLISIS DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO SEGÚN
NORMAS IEEE 1584 Y NFPA 70E**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

PAUL ALEJANDRO CONDORI

**PROMOCIÓN
2010- II**

**LIMA – PERÚ
2014**

**ANÁLISIS DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO SEGÚN
NORMAS IEEE 1584 Y NFPA 70E**

Dedicatoria

Con todo mi amor:

A mis padres Agustina Condori Uturunco y Paulino Alejandro Hilario a quienes debo todo su esfuerzo mostrado día a día de una forma incansable que solo dos padres llenos de amor hacia sus hijos pueden mostrar.

A mi hermano Elmer Alejandro Condori quien con su no presencia en cuerpo es mi mayor guía y protector en vida.

A mi hermano Fredy Alejandro Condori quien es mi mayor ejemplo a seguir.

SUMARIO

El presente informe muestra la problemática originada por los riesgos de las personas relacionados al Arco Eléctrico en todo el mundo y la preocupación por los organismos internacionales en minimizar los riesgos originados por el Arco Eléctrico a las personas.

El límite del alcance del presente informe es la protección a personas mas no a equipos eléctricos, para lograr esto se analiza los comentarios mas resaltantes de las normas internacionales IEEE 1584 y NFPA 70E los cuales se utilizan para calcular la energía incidente en el personal electricista con el fin de proponer mejoras de ingeniería y la utilización de elementos como equipos de protección personal que reduzcan los riesgos a situaciones de menor impacto que puedan ser soportables. En la actualidad este análisis se tiene incorporado en *software* de ingeniería eléctrica como es el ETAP, del cual se aprovecha sus bondades para realizar una aplicación al proyecto de Mina Constancia ubicado en el departamento del Cusco y analizar los diferentes riesgos que se pueden presentar en una posible falla del sistema eléctrico de cualquier instalación mostrando las conclusiones y recomendaciones para que en adelante cualquier instalación eléctrica considere oportuna la elaboración de un correcto análisis y reducción de riesgos a su personal electricista.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivos.	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance.	3
1.4. Metodología.....	4
CAPÍTULO II	5
METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SEGÚN IEEE 1584.....	5
2.1. Resumen.....	5
2.2. Objetivo.....	5
2.3. Alcance.	5
2.4. Definiciones.....	5
2.5. Procedimiento de Cálculo de Riesgo Eléctrico según IEEE 1584.	7
2.5.1. Desarrollo.....	7
2.5.2. Limitaciones.	7
2.5.3. Procedimiento.	9
2.5.4. Modelo para el Cálculo de Energía Incidente.	13
2.5.5. Rango del Modelo.	13
2.5.6. Corriente de Arco.	13
2.5.7. Energía incidente.....	14
2.5.8. Método Lee.	15
2.5.9. Límite de Protección Contra Arco eléctrico desde 1000V a 15000V.	16
2.5.10. Límite de Protección Contra Arco eléctrico para tensiones mayores de 15000V.	16
2.5.11. Ecuaciones de energía incidente y límite de protección contra flameo en interruptores automáticos de baja tensión.	17
CAPÍTULO III	20
METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SEGÚN NFPA70E.....	20
3.1. Resumen.....	20

3.2.	Objetivo.....	20
3.3.	Alcance.....	20
3.4.	Definiciones.....	20
3.5.	Procedimiento de Cálculo de Riesgo Eléctrico Según NFPA 70E.....	21
3.5.1.	Desarrollo.....	21
3.5.2.	Limitaciones.....	31
3.5.3.	Procedimiento.....	32
3.5.4.	Calculo de Limite de Protección contra Flameo.....	34
3.5.5.	Distancia de Frontera de Protección contra el Arco Eléctrico.....	34
3.5.6.	Cálculos de Energía incidente.....	35
CAPÍTULO IV.....		38
APLICACIÓN DE SOFTWARE EN CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO.....		38
4.1.	Resumen.....	38
4.2.	Objetivo.....	38
4.3.	Alcance.....	38
4.4.	Definiciones.....	38
4.5.	Software ETAP.....	38
4.6.	Metodología Del Cálculo.....	40
4.6.1.	Metodología según Estándar IEEE 1584.....	40
4.6.2.	Metodología según NFPA 70E.....	40
4.7.	Análisis de los resultados obtenidos.....	40
4.8.	Características.....	40
CAPÍTULO V.....		42
EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO EN EL PROYECTO MINA CONSTANCIA.....		42
5.1.	Introducción.....	42
5.2.	Generalidades.....	42
5.3.	Objetivos.....	43
5.4.	Alcance.....	43
5.5.	Sistema Eléctrico.....	43
5.6.	Análisis de Arco Eléctrico.....	47
5.7.	Equivalente Thevenin.....	48
5.8.	Cargas de Simulación.....	49
5.9.	Otras Zonas.....	55
5.10.	Simulación.....	58

5.11. Coordinación de Protección.....	63
5.12. Resultados y Reportes de ETAP.	65
5.13. Solución con fibra óptica.....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76

LISTA DE TABLAS

TABLA N° 2.1 Tiempo de Apertura de Tipos de Interruptores.....	11
TABLA N° 2.2 Clases de Equipos y Separaciones Típicas entre barras	12
TABLA N° 2.3 Clases de Equipos y Distancias Típicas de Trabajo	12
TABLA N° 2.4 El factor de distancia vs Separación Típica entre conductores	15
TABLA N° 2.5 Ecuaciones de Energía incidente y límites de protección contra Arco Eléctrico para diferentes tipos de interruptores y rangos de corriente.	17
TABLA N° 3.1 Normas internacionales para equipos de protección personal	23
TABLA N° 3.2 Clasificación de Categoría de Riesgo.	24
TABLA N° 3.3 Matriz de Ropa de Protección según Categoría de Riesgos.	30
TABLA N° 3.4 Limitaciones de los diferentes métodos de cálculo.....	32
TABLA N° 5.1 Potencias de cortocircuito en Subestación Constanca 220kV.	43
TABLA N° 5.2 3100-LC-101: Centro de Distribución de MT de Chancado Primario.	50
TABLA N° 5.3 3100-MC-102: CCM de Chancado Primario.....	51
TABLA N° 5.4 3100-LC-201: Centro de Distribución de MT de Línea 1 Molienda.....	54
TABLA N° 5.5 Lista de las Otras Cargas.....	56
TABLA N° 5.6 Evolución del riesgo por Arco Eléctrico.	66

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 Característica típica de curva tiempo-corriente de interruptores.....	18
Fig. 3.1 Esquema de Límites de Proximidad	34
Fig. 4.1 Editor de barras del software ETAP.	39
Fig. 5.1 Diagrama Unifilar General Constancia - Media y Baja Tensión I.	45
Fig. 5.2 Diagrama Unifilar General Constancia - Media y Baja Tensión II.	46
Fig. 5.3 ETAP-Niveles de Riesgo según NFPA 70E.....	47
Fig. 5.4 ETAP-Datos de análisis de Arco Eléctrico según IEEE 1584.	47
Fig. 5.5 ETAP-Datos de análisis de <i>Shock</i> Eléctrico según NFPA70E.	48
Fig. 5.6 Equivalente Thevenin de Mina Constancia.....	48
Fig. 5.7 ETAP-Simulación de Diagrama Unifilar Principal.	59
Fig. 5.8 ETAP-Network 1 Simulación Análisis de Arco Eléctrico de 3100-MC-102 CCM de Chancado.....	60
Fig. 5.9 ETAP-Network 2- Análisis de Arco Eléctrico de 3100-LC-01 Centro de Distribución MT de Chancado Primario.	61
Fig. 5.10 ETAP-Network 3- Análisis de Arco Eléctrico de 3220-LC-201 Centro de Distribución MT de Línea 1 Molienda.	62
Fig. 5.11 Curva Tiempo-Corriente de los Interruptores de Potencia de Baja Tensión C5 y C-Principal-CCM.....	63
Fig. 5.12 Curva Tiempo-Corriente del Relé 1 y Relé 4	64
Fig. 5.13- Curva Tiempo-Corriente del Relé 8 y Relé 10.	65
Fig. 5.14 Resultados del <i>Software</i> ETAP.	67
Fig. 5.15 ETAP: Etiquetas de Riesgo por Arco Eléctrico según NFPA 70E.	68
Fig. 5.16 Relé Óptico Multilin A60 Sistema Contra Arco Eléctrico / Marca GE.	70
Fig. 5.17 Distribución típica de fibra óptica en tableros eléctricos.	70
Fig. 5.18 Diagrama de Bloques de un relé con detección de Arco Eléctrico.	71
Fig. 5.19 Comparación de los tiempos de operación de disparo.	72
Fig. 5.20 Niveles de energía incidente con protección instantánea y de sobrecorriente de respaldo	72
Fig. 5.21 Disposición simple de la fibra óptica para protección contra Arco Eléctrico.	73

PRÓLOGO

Los miles de accidentes originados en todo el mundo a causa del fenómeno del Arco Eléctrico y a que en el Perú recientemente se esté tomando interés por la aplicación de las normas internacionales como la IEEE 1584 y la NFPA 70E son las principales causas que generaron el interés en elaborar el presente informe.

Este informe hace referencia a los análisis que se hacen para mitigar los riesgos en las personas para lo cual se estructura en seis capítulos que están en cuatro partes:

La primera parte está conformada por el capítulo I donde se muestra los objetivos, alcance, justificación y metodología del presente informe.

La segunda parte está conformada por los capítulos II y III donde se muestra las recomendaciones y formas de cálculo del riesgo originado por el Arco Eléctrico según las normas internacionales.

La tercera parte está conformada por el capítulo IV donde se muestra las bondades de utilizar un software especializado de ingeniería eléctrica como es el ETAP para el cálculo del riesgo por Arco Eléctrico.

La cuarta parte está conformada por el capítulo V donde se muestra el análisis de riesgo por el Arco Eléctrico aplicado al proyecto Mina Constancia, ubicado en Cusco.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos.

El presente informe de suficiencia tiene por objetivo analizar el riesgo originado por el Arco Eléctrico según las normas internacionales IEEE 1584 y NFPA 70E, con estos resultados se establecerán medidas de protección y control para los diferentes tipos de instalaciones, cuya implementación reducirá los riesgos a los que los trabajadores están expuestos.

1.2. Justificación.

El crecimiento económico del Perú en los últimos años va de la mano con el crecimiento de la demanda energética, esto se debe al crecimiento continuo de los siguientes sectores productivos de nuestro país:

- Sector Pesquero.
- Sector Hidrocarburos.
- Sector Minero.
- Sector Energético.
- Otros Servicios.

Todas las actividades productivas de cada uno de estos sectores requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

Los sistemas eléctricos encontrados en dichos sectores comprende: sistemas de Alta, Media y Baja tensión, celdas eléctricas de media tensión, tableros eléctricos de baja tensión, Centro de control de Motores (CCM), *switchgear* de Media Tensión, *switchgear* de baja tensión, cables, equipos de protección y otros.

Para que cada sector tenga productividad se requiere de la operación eficiente y segura de todos los sistemas eléctricos dentro de cada sector, debido a esto el personal electricista que realiza dicha labor se encuentra en constante exposición al riesgo por Arco Eléctrico lo cual origina pérdidas humanas y económicas.

Estos riesgos han ocasionado gran preocupación en la salud ocupacional del trabajador debido a *Shocks* eléctricos ocasionados por la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de energía en cualquier industria mundial. La OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) se ha mostrado alerta a dicho fenómeno y en coordinación con el comité de Seguridad Eléctrica del NEC (*National Electrical Code*) crearon una norma que establezca recomendaciones de seguridad para el sector eléctrico, dicha norma es la NFPA 70E la cual ha sido concebida teniendo como referencia el contenido del NEC.

Los integrantes del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) también se han mostrado muy preocupados por el fenómeno del Arco Eléctrico y han creado el estándar IEEE 1584 "*Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*" el cual brinda una referencia de cálculo de energía incidente debido al fenómeno de Arco Eléctrico.

Es así que a nivel de normatividad mundial referente al Arco Eléctrico se tiene como principales normas:

- IEEE 1584: *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*.
- NFPA 70E: *Standard for electrical safety in the workplace*.

El presente informe nace porque se tiene un fenómeno de un alto riesgo llamado Arco Eléctrico y dos estándares internacionales que su aplicación en la industria del Perú aún es muy reciente, debido a ello se tiene el principal interés de mostrar el análisis de los diferentes tipos de riesgos originados por el Arco Eléctrico según los estándares IEEE 1584 y NFPA 70E, con estos resultados se establece medidas de prevención y control para los diferentes tipos de instalaciones, cuya implementación reducirá los riesgos a los que los trabajadores electricistas están expuestos y para hacerlo más entendible se evaluará el riesgo eléctrico por Arco Eléctrico en las instalaciones eléctricas de un proyecto minero de nuestro País, Mina Constancia que se ubica en el departamento del Cusco, actualmente en construcción, del cual se mostrará el sistema eléctrico total de la mina y las cargas de operación minera como son los molinos, chancadora, bomba de ciclones, faja transportadora y otros.

1.3. Alcance.

Los límites para el presente informe son:

- Mostrar las características más resaltantes de las normas IEEE 1584 y NFPA 70E en relación a la protección del personal de los riesgos de Arco Eléctrico.
- Mostrar las bondades de la utilización de software de simulación de ingeniería eléctrica ETAP en los cálculos de riesgos de Arco Eléctrico.
- Analizar los riesgos por Arco Eléctrico en las instalaciones eléctricas del proyecto mina Constancia (zonas de chancado y molienda).

1.4. Metodología.

El presente informe se ha elaborado con el análisis de los contenidos de normas internacionales IEEE 1584 y NFPA 70E referente al Arco eléctrico, las cuales son mencionadas en los capítulos II y III, siendo este análisis el principal fundamento teórico que rigen los estándares más altos a nivel mundial.

Existen compañías que han desarrollado software de simulación de sistemas eléctricos de potencia y que calculan el riesgo por Arco Eléctrico con la información recopilada y analizada de las normas internaciones, el presente informe analiza los datos más resaltantes de un software de simulación llamado ETAP que realiza estos cálculos y muestra las características de sus cálculos.

Para realizar el cálculo aplicativo del riesgo por arco eléctrico se ha analizado el sistema eléctrico de la mina Constancia, con la información de la ingeniería de básica del proyecto lo cual se ha representado y simulado en el Software ETAP, considerando el análisis para los años de 2016 al 2018.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SEGÚN IEEE 1584.

2.1. Resumen.

Esta metodología proporciona técnicas en el diseño y operación de instalaciones para determinar la distancia de seguridad del arco eléctrico y la energía incidente en que el personal pueda estar expuesto durante su trabajo o cerca de equipos eléctricos energizados.

2.2. Objetivo.

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar el cálculo de energía incidente debido al arco eléctrico y límites de arco eléctrico en sistemas trifásicos de corriente alterna a la que los trabajadores pueden estar expuestos según el estándar IEEE 1584 (1). Abarca las ecuaciones necesarias para encontrar la energía incidente, la frontera de protección contra el Arco Eléctrico y el proceso de análisis de los resultados finales. Todos los cálculos se refieren a un modelo derivado empíricamente incluyendo los equipos en lugares cerrados y al aire libre para tensiones de 208V a 15kV, y un modelo derivado teóricamente aplicable para cualquier tensión (Método Lee).

2.3. Alcance.

En este capítulo se proporciona técnicas para el diseño y operación de las instalaciones para aplicar en la determinación de la distancia de seguridad de arco eléctrico y la energía incidente en que los empleados puedan estar expuestos durante su trabajo o cerca de equipos eléctricos, estas técnicas son en base a datos estadísticos y en un modelo experimental obtenidos del estándar IEEE 1584.

2.4. Definiciones.

El estándar IEEE 1584 hace referencia a las siguientes definiciones que se toman como referencia del documento de *"The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition"* (2):

- Peligro de Arco Eléctrico: Una condición peligrosa asociada con la liberación de energía causada por un arco eléctrico.

- Corriente de falla del Arco Eléctrico: Una corriente de falla que fluye a través de un plasma de arco eléctrico.
- Corriente de falla disponible: La corriente eléctrica que puede ser proporcionado por la entidad que suministra la energía eléctrica y la instalación de dispositivos de generación de propiedades eléctricas y motores eléctricos grandes, teniendo en cuenta la cantidad de impedancia en la trayectoria de la corriente.
- Corriente de falla franca: Un cortocircuito o contacto eléctrico entre dos conductores a diferentes potenciales en el que la impedancia o resistencia entre los conductores es esencialmente cero.
- Circuito: Un conductor o sistema de conductores a través del cual una corriente eléctrica fluye.
- Riesgo eléctrico: Una condición peligrosa en la que el contacto a un equipo inadvertido cause una falla que puede provocar una descarga, quemadura por arco eléctrico, quemadura térmica o explosión.
- Descarga eléctrica: Corriente eléctrica que pasa a través del cuerpo del personal electricista que opera un equipo energizado.
- Material eléctrico de utilización: Equipo que utiliza la energía eléctrica para la electrónica, electromecánica, química, calefacción, iluminación, o usos similares.
- Energizado: Eléctricamente conectado a una fuente de tensión.
- Expuesto (partes activas): Capaz de ser inadvertidamente tocado o más cerca que una distancia de seguridad por una persona. Se aplica a las partes que no están adecuadamente aisladas.
- Corriente de falla: Una corriente que fluye de un conductor a tierra o hacia otro conductor debido a una conexión anormal (incluyendo un arco) entre los dos.
- Análisis del riesgo del Arco Eléctrico: Un método para determinar el riesgo de daños personales como resultado de la exposición a la energía incidente de un Arco Eléctrico.
- Límite de protección de Arco Eléctrico: Un límite de una distancia de las partes activas que son sin aislamiento o expuesta dentro de la cual una persona puede recibir una quemadura de segundo grado. (Sinónimo: límite de protección de arco eléctrico).
- Energía incidente: La cantidad de energía disipada sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante un evento de Arco Eléctrico. La energía incidente se mide en Julios por centímetro cuadrado ($\frac{J}{cm^2}$) o Calorías por centímetro cuadrado ($\frac{Cal}{cm^2}$).

- Usuarios: Personal que utiliza la norma IEEE 1584 con la finalidad de reducir el riesgo eléctrico por Arco Eléctrico.

2.5. Procedimiento de Cálculo de Riesgo Eléctrico según IEEE 1584.

El estándar IEEE 1584 muestra el:

2.5.1. Desarrollo.

Un análisis de riesgo de arco eléctrico se debe realizar en la asociación y como continuación del estudio de cortocircuito y estudio de coordinación de protección. Los resultados del estudio de cortocircuito se utilizan para determinar la corriente de falla para determinar la capacidad de soporte de cortocircuito de los equipos eléctricos. Los resultados del estudio de coordinación de protección se utilizan para determinar el tiempo requerido en los dispositivos de protección de circuitos eléctricos para aislar las condiciones de sobrecarga o de cortocircuito. Los resultados de ambos estudios de cortocircuito y coordinación de protección proporcionan la información necesaria para realizar un análisis de riesgos de Arco Eléctrico. Los resultados del análisis de riesgos de Arco Eléctrico se utilizan para identificar el límite de protección de Arco Eléctrico y la energía incidente en asignadas distancias de trabajo en cualquier posición o nivel en la generación eléctrica en general, sistema de distribución o la utilización de la transmisión.

2.5.2. Limitaciones.

A modo de guía de la IEEE 1584, el presente informe sugiere enfoques para la realización de un análisis de riesgo de Arco Eléctrico. Siguiendo las sugerencias del estándar IEEE 1584 donde se indica claramente que *“No garantiza la seguridad, y los usuarios deben tomar todas las medidas independientes razonables necesarios para minimizar los riesgos del Arco Eléctrico”* (1).

Los usuarios deben ser conscientes de que los modelos del estándar IEEE 1584 se basan en el arco de corriente de energía incidente en un conjunto específico de condiciones de prueba y de trabajo teórico. Distancias, que son la base para las ecuaciones, se basan en la distancia medida del instrumento de prueba de la fuente de punto de arco eléctrico. Estos modelos permite a los usuarios calcular la estimación de la energía incidente máxima y la distancia límite de Arco Eléctrico estimado.

Exposiciones de arco reales pueden ser más o menos graves que la indicada por estos modelos.

Este documento tiene por objeto servir de guía para el cálculo de la energía incidente y límites de protección de Arco Eléctrico. Una vez calculada, esta información se puede utilizar como una base para desarrollar estrategias que tienen el objetivo de reducir al mínimo las lesiones por quemaduras. Las estrategias incluyen la especificación del

equipo de protección personal (EPP), trabajar sin energía y después de otras técnicas de ingeniería y prácticas de trabajo.

Este estándar IEEE 1584 se basa en las pruebas y el análisis de los riesgos causados por la energía incidente. Los efectos potencialmente peligrosos de salpicaduras de metal fundido, proyectiles, los impulsos de presión, y el arco de subproductos tóxicos no han sido considerados en estos métodos.

Las corrientes de falla disponibles deben ser determinadas en el punto de cada falla potencial, no utilice los valores de corriente de fallas trifásicas excesivamente conservadoras, un valor muy conservador puede resultar en una menor energía incidente calculada que en realidad puede ser posible dependiendo de la respuesta de tiempo-corriente del dispositivo de protección. Los resultados bajos podrían ser causados por el uso de un valor de respuesta tiempo-corriente más rápido de la curva tiempo-corriente del dispositivo de protección.

Cuando se utilicen EPP para el riesgo de arco eléctrico debe de considerarse que es la última línea de defensa. La protección no tiene por objeto prevenir las lesiones pero sí para mitigar el impacto de un arco eléctrico en el individuo, en caso de que ocurriera. En muchos casos, el uso de EPP ha salvado vidas y ha logrado prevenir lesiones. Los cálculos de este estándar le conducirá a la selección de un nivel de EPP que es un equilibrio entre la exposición estimada de energía incidente calculada y la actividad laboral se realiza cumpliendo con lo siguiente:

- a) El deseo de proporcionar suficiente protección para evitar una quemadura de segundo grado en todos los casos.
- b) Evitar proporcionar más protección que el necesario. Los riesgos se pueden originar por el estrés por calor que produce el uso excesivo de prendas, la mala visibilidad y el movimiento limitado del cuerpo.

El estándar IEEE 1584 no pretende dar a entender que los trabajadores estén autorizados a realizar trabajos en equipos energizados expuestos o partes del circuito. Se recomienda que siempre se dé prioridad a trabajar en sistemas sin energía (1).

El trabajo realizado intencionalmente sobre o cerca de equipos o circuitos de energía está limitado por las normas y reglamentos, como las emitidas por OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), la OSHA limita seriamente las situaciones en las que el trabajo se lleva a cabo cerca o en los equipos o circuitos que están o pueden estar energizados.

"Las partes a las que puede estar expuesto un empleado, deberán estar sin energía antes de que el empleado trabaje cerca de ellas, a menos que el dueño de la compañía

pueda demostrar que la desenergización introduce riesgos adicionales o aumentadas o no es factible debido al diseño del equipo o las limitaciones operativas."

Las consideraciones económicas no son una razón suficiente para trabajar cerca de circuitos energizados.

Es primordial proporcionar medios de desconexión adecuados y de fácil acceso desde diferentes equipos para ser trabajados y permitir el aislamiento y desenergización. Los diseños de ingeniería deben ser lo más apropiado para el sistema, equipo, protección, y otros para reducir al mínimo la magnitud y duración de la corriente de falla, es bueno recordar que el cambio de la configuración de protección puede reducir la corriente de falla. También es posible tener en cuenta las prácticas de trabajo alternativos que ofrecen mayores distancias de trabajo.

2.5.3. Procedimiento.

Para realizar el procedimiento de cálculo adecuado de los riesgos por Arco Eléctrico se debe realizar los siguientes pasos:

- **Paso 1: Recopilar los datos del sistema eléctrico.**

El esfuerzo más grande en un estudio de riesgo de Arco Eléctrico es la recopilación de los datos de campo. Incluso para una planta con diagramas unifilares actualizados, curvas de tiempo-corriente, y el estudio de cortocircuito en un equipo, la parte de campo del estudio se llevará cerca de la mitad del esfuerzo.

Si bien los datos necesarios para este estudio es similar a los datos recogidos para el estudio de coordinación de dispositivos de cortocircuito y protección.

Los diagramas unifilares deben mostrar todos los transformadores, líneas de transmisión, circuitos de distribución, puesta a tierra del sistema eléctrico, reactores limitadores de corriente y otros dispositivos limitadores de corriente, corrección o estabilización de los condensadores de tensión, seccionadores, interruptores, centros de control de motores (MCC), tableros de distribución, incluyendo los dispositivos de protección, interruptor de carga, incluyendo tipos de fusibles y tamaños, alimentadores, circuitos de ramales, así como motores de bajo nivel de tensión de 600V o 400V, y transformadores de medida y dispositivos de protección.

No es necesario considerar equipos con tensiones nominales menores a 240V a menos que involucre una potencia de 125kVA.

Obtener la potencia de falla trifásica MVA disponibles y el ángulo de potencia o relación X/R del equivalente Thevenin de la fuente de suministro, este valor lo puede proporcionar el COES (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional), nivel de falla disponible y relación X/R al punto de servicio, los datos de fallas disponibles deben ser realistas.

Para los transformadores, generadores, motores grandes, y conmutadores, tenga en cuenta todos los datos de la placa. Típicamente esto incluye los rangos de tensión o la configuración de tap, capacidad de corriente, kilovatios o kilovoltios amperios, corriente nominal, impedancia o transitoria/ datos reactancia subtransitoria y otros.

- **Paso 2: Determinar el funcionamiento del sistema.**

En un sitio con un sistema de distribución radial sencillo sólo hay un modo de operación normal, pero un sistema más complejo puede tener muchos modos. Ejemplos de modos incluyen:

- Uno o más Alimentadores en la fuente se suministro.
- Utilidad de interfaz de barra de subestación secundaria con interruptor abierto o cerrado.
- Unidad de subestación con uno o dos alimentadores primarios.
- Unidad de subestación con dos transformadores con el lado secundario abierto o cerrado.
- MCC con uno o dos alimentadores, uno o ambos energizados.
- Generadores en paralelo con la fuente de línea eléctrica o en modo de espera a energizarse.

Es importante para determinar la corriente de cortocircuito para los modos de operación que proporcionan tanto el máximo y las corrientes de cortocircuito mínimos disponibles.

- **Paso 3: Determinar las corrientes de fallas trifásicas.**

Introducir todos los datos de los diagramas unifilares y el esfuerzo de recopilación de datos en un software de simulación de ingeniería eléctrica, para nuestro ejemplo se utilizara el ETAP (vea el capítulo IV y V).

Encuentre la corriente de falla simétrica trifásica y la relación X/R en cada punto del sistema donde el personal electricista pueda estar ejecutando una maniobra con el sistema energizado y pueda ocurrir una falla trifásica), no necesita ser ejecutado para cada nodo, ya que algunos nodos no afectarán significativamente la corriente de falla en todas las barras.

Es importante incluir todos los cables, porque una falla en el lado de alta no necesariamente aumenta la seguridad en el lado de baja: puede reducirlo. Corrientes de falla más bajas a menudo persisten debido corrientes más altas en el lado de baja.

- **Paso 4: Determine las corrientes de falla de Arco Eléctrico.**

La corriente de falla del Arco Eléctrico en el lugar que se simula y la parte de esa corriente que pasa a través del primer dispositivo de protección aguas arriba debe ser encontrada.

La corriente de falla de arco depende principalmente de la corriente de falla trifásica. La

corriente de falla trifásica en el dispositivo de protección se puede encontrar a partir del estudio de cortocircuito realizando una simulación en una sola barra.

La corriente de falla del Arco Eléctrico calculado será más bajo que la actual falla franca trifásica debido a la impedancia del arco, especialmente para aplicaciones en sistemas de baja tensión (<1000 V). Para aplicaciones de media tensión, la corriente de falla del Arco Eléctrico es todavía un poco más bajo que la actual falla franca, y debe ser calculado.

- **Paso 5: Encuentre las características de los dispositivos de protección y la duración de los arcos.**

En el estudio de campo se pudo haber encontrado el sistema actualizado, tener al día las curvas de tiempo-corriente. Si no es así, lo mejor es utilizar el software disponible en el mercado que facilita este análisis. Alternativamente, para un estudio muy simple, es posible utilizar las características del dispositivo de protección, que se pueden encontrar en los datos del fabricante.

La TABLA N° 2.1 muestra los tiempos de operación de interruptores recomendados. El tiempo de apertura para determinados interruptores pueden ser verificados mediante la consulta de la información del fabricante.

TABLA N° 2.1 Tiempo de Apertura de Tipos de Interruptores

Tipos de Interruptores	Tiempo de Apertura en 60Hz (ciclos)	Tiempo de Apertura en segundos (s)
Baja Tensión (caja moldeada) (<1000V) (disparo integral)	1.5	0.025
Baja Tensión (caja aislada) (<1000V) interruptor de potencia (disparo integral o relé de operación)	3	0.050
Media Tensión (1-35kV)	5	0.080
Media y Alta Tensión (>35kV)	8	0.130

Para un conjunto limitado de casos, esta información se incorpora en el modelo y no se requieren curvas de tiempo-corriente. Algunas clases de fusibles limitadores de corriente se ponen a prueba para determinar el efecto de la acción de limitación de corriente de la energía incidente y los resultados se han incluido en el modelo. Una solución generalizada ha sido desarrollada por algunos interruptores automáticos con relé integral,

y es parte del modelo. Se lleva a cabo sólo si la corriente de arco se encuentra en el rango de nivel instantáneo o más alta para el interruptor de circuito.

- **Paso 6: Tensiones del sistema eléctrico y las clases de equipos.**

Para cada barra, documentar la tensión del sistema y la clase de equipo tal como se muestra en la TABLA N° 2.2, esto permitirá la aplicación de ecuaciones basados en las separaciones típicas entre barras de equipos estándar, cables y otros según la TABLA N° 2.2.

- **Paso 7: Seleccione las distancias de trabajo.**

Protección de Arco Eléctrico siempre se basa en el nivel de energía incidente sobre la cara y el cuerpo de la persona que realiza el trabajo, no la energía incidente en las manos o los brazos, el grado de lesión en una quemadura depende del porcentaje de la piel de una persona que se quema. La cabeza y el cuerpo son un gran porcentaje de la superficie total de la piel y lesiones a estas áreas pone más en peligro la vida de las personas y daños que pueden causar en sus extremidades. Distancias típicas de trabajo se muestran en la TABLA N° 2.3.

TABLA N° 2.2 Clases de Equipos y Separaciones Típicas entre barras

Clase de Equipo	Separaciones Típicas entre barras (mm)
15kV <i>Switchgear</i>	152
5kV <i>Switchgear</i>	104
<i>Baja Tensión Switchgear</i>	32
<i>Baja Tensión MCC y Tableros eléctricos</i>	25
Cable	13
Otros	No requerido

TABLA N° 2.3 Clases de Equipos y Distancias Típicas de Trabajo

Clase de Equipo	Distancias Típicas de Trabajo (mm)
15kV <i>Switchgear</i>	910
5kV <i>Switchgear</i>	910
<i>Baja Tensión Switchgear</i>	610
<i>Baja Tensión MCC y Tableros eléctricos</i>	455
Cable	455
Otros	Debe ser determinado en campo.

- **Paso 8: Determinación de energía incidente para todos los equipos**

Se seleccionara un *software* de simulación de cálculo de Arco Eléctrico que arroje valores de la energía incidente para cada equipo donde se realice maniobras y puedan originar riesgos a las personas.

- **Paso 9: Determine la frontera de protección contra Arco Eléctrico para todos los equipos.**

Encontrar la frontera de protección, las ecuaciones para encontrar la energía incidente serán resueltas para una distancia desde la posible fuente del arco eléctrico a donde puede ocasionar quemaduras de Segundo grado en el cuerpo del trabajador. Los programas o *software* incluyen la frontera de protección contra el Arco Eléctrico basado en una energía incidente de 5.0 J/cm^2 ($5.0 \text{ J/cm}^2 = 1.2 \text{ cal/cm}^2$).

2.5.4. Modelo para el Cálculo de Energía Incidente.

Este método ofrece las ecuaciones necesarias para la estimación de la energía incidente y los límites de protección contra el flameo, basado en análisis estadísticos y ajuste de curvas de datos disponibles de pruebas.

Los datos fueron generados por pruebas realizadas por un grupo de trabajo del IEEE, destinadas a reproducir los modelos de la energía incidente. Basados en los niveles normalizados para la selección de equipos de protección personal (EPP), se estimó que un EPP es adecuado o más que adecuado, si protegía contra quemaduras de segundo grado el 95% de las veces (1).

2.5.5. Rango del Modelo.

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

- Las Tensiones en el rango de 208V-15,000V, sistemas Trifásicos.
- Las frecuencias de 50 Hz o 60 Hz, en el caso peruano 60Hz.
- Corrientes de falla en los rangos de 700A-106,000A.
- Puesta a tierra de todos los tipos y sin conexión a tierra.
- Lugares cerrados con equipos de tamaños comúnmente disponibles (celdas, CCM, tableros eléctricos y otros).
- La separación entre los conductores de 13 mm-152 mm.
- Fallas trifásicas.

2.5.6. Corriente de Arco.

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

Para aplicación de sistemas por debajo de 1000V, se tiene la siguiente ecuación:

$$\log I_a = K + 0,662 \log I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\log I_{bf}) - 0,00304 G (\log I_{bf}) \quad (2.1)$$

Donde:

log: Es Logaritmo en base 10.

I_a : Es la Corriente de arco en (kA).

K : Es $-0,153$ para configuraciones abiertas.

Es $-0,097$ para configuraciones cerradas (celdas, CCM, Tableros eléctricos).

I_{bf} : Es la corriente de Falla Trifásica simétrica RMS (kA)

V : Tensión del Sistema (kV).

G : Es la separación típica entre barras (mm).

Para aplicación de sistemas de 1000V a más, se tiene la siguiente ecuación:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (2.2)$$

Para el caso de sistemas de 1000V a más no se considera si la configuración es al aire libre o en configuraciones cerradas.

El cálculo de la corriente del segundo arco eléctrico es de 85% de I_a .

2.5.7. Energía incidente.

Primero se procede a encontrar la energía normalizada (E_n), esta energía es calculada para un tiempo de arco eléctrico de 0,2s y considerando una distancia de 610mm entre un posible punto de arco eléctrico a la persona.

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011 G \quad (2.3)$$

Donde:

E_n : Energía Incidente normalizada ($\frac{J}{cm^2}$).

K_1 : Es $-0,792$ para configuraciones al aire libre.

Es $-0,555$ para configuraciones cerradas

K_2 : Es 0 para sistemas sin puesta a tierra.

Es 0,113 para sistemas con puesta a tierra.

G : Es la separación entre barras (mm).

Finalmente se convierte:

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

E: Energía incidente ($\frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2}$).

C_f : Factor de Cálculo

1 para sistemas mayores a 1000V.

1,5 para sistemas menores o iguales a 1000V.

E_n : Energía Incidente normalizada ($\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$).

t : Tiempo de duración del arco eléctrico (s).

D : Distancia del posible punto de arco eléctrico hacia el cuerpo de la persona (mm).

x : Factor de distancia.

El factor de distancia (X) se obtiene de la siguiente TABLA N° 2.4.

TABLA N° 2.4 El factor de distancia vs Separación Típica entre conductores

Tensión de Sistema (kV)	Tipo de Equipo	Separación típica entre conductores (G en mm)	Factor de distancia (X)
0,208-1	Aire libre	10-40	2
	Switchgear	32	1,473
	CCM y Tableros	25	1,641
	Cables	13	2
>1-5	Aire libre	102	2
	Switchgear	13-102	0,973
	Cables	13	2
>5-15	Aire libre	13-153	2
	Switchgear	153	0,973
	Cables	13	2

2.5.8. Método Lee.

Para casos donde la tensión del sistema es superior a 15kV o la separación está fuera de los rangos del modelo empírico, se puede aplicar el modelo teóricamente derivado de Lee, de donde se obtiene la siguiente fórmula para la energía incidente (3):

$$E = 5,12 \times 10^5 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right)$$

(2.5)

Donde:

E: Energía Incidente ($\frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2}$).

V: Tensión del Sistema (kV)

t: Tiempo del arco eléctrico

D: Distancia del posible punto de arco eléctrico hacia el cuerpo de la persona (mm).

I_{bf} : Corriente de falla trifásica.

Para tensiones mayores a 15kV, la corriente de arco eléctrico es igual a la corriente de la falla.

2.5.9. Límite de Protección Contra Arco eléctrico desde 1000V a 15000V.

Para el modelo empíricamente derivado en donde las tensiones tienen un rango de 1000V a 15000V el límite de la protección contra el arco eléctrico se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_B = \left[C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.6)$$

2.5.10. Límite de Protección Contra Arco eléctrico para tensiones mayores de 15000V.

En el caso que la tensión sea mayor a 15000V (Método de Lee), el cálculo de la distancia límite de la protección contra el arco eléctrico se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_B = \sqrt{5,12 \times 10^5 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.7)$$

Donde:

D_B : Es la Distancia de la frontera desde el punto de Arco Eléctrico (mm)

C_f : Es el Factor de cálculo

1 para tensiones mayores a 1000V.

1,5 para tensiones menores o iguales a 1000V.

E_n : Energía incidente normalizada ($\frac{J}{cm^2}$)

E_B : Energía incidente en la distancia de frontera ($\frac{cal}{cm^2}$)

t: Tiempo de duración del arco eléctrico en segundos (s).

x: Factor de distancia según la TABLA N° 2.4.

I_{bf} : Corriente de Falla.

2.5.11. Ecuaciones de energía incidente y límite de protección contra flameo en interruptores automáticos de baja tensión.

En los sistemas de baja tensión se tienen interruptores automáticos como sistemas de protección debido a las curvas de tiempo-corriente de cada equipo de protección. Las siguientes ecuaciones de la TABLA N° 2.5 se pueden emplear dentro de los rangos de 700A-106000A para las tensiones mostradas en la tabla siguiente.

Cada ecuación es aplicable para el rango de $I_1 < I_{bf} < I_2$, lo cual depende del interruptor automático.

TABLA N° 2.5 Ecuaciones de Energía incidente y límites de protección contra Arco Eléctrico para diferentes tipos de interruptores y rangos de corriente.

Rango de Interruptor	Tipo de Interruptor	Tipo de Disparo	480 V y menores tensiones		575-690 V	
			Energía (Cal/cm ²)	D limite (mm)	Energía (J/cm ²)	D limite (mm)
100-400	MCCB	TM o M	$0,045I_{bf} + 0,13$	$9,16I_{bf} + 194$	$0,065I_{bf} + 0,040$	$11,8I_{bf} + 196$
600-1200	MCCB	TM o M	$0,053I_{bf} + 0,38$	$8,45I_{bf} + 364$	$0,080I_{bf} + 0,090$	$11,4I_{bf} + 369$
600-1200	MCCB	E, LI	$0,090I_{bf} + 0,324$	$12,50I_{bf} + 428$	$0,112I_{bf} + 11,00$	$14,3I_{bf} + 568$
1600-6000	MCCB o ICCB	TM o E, LI	$0,107I_{bf} + 0,72$	$11,10I_{bf} + 696$	$0,164I_{bf} + 0,040$	$16,7I_{bf} + 606$
800-6300	LVPCB	E, LI	$0,150I_{bf} + 0,88$	$14,50I_{bf} + 786$	$0,230I_{bf} + 0,070$	$19,1I_{bf} + 864$
800-6300	LVPCB	E, LS	$1,090I_{bf} + 6,51$	$47,20I_{bf} + 2660$	$1,640I_{bf} + 0,519$	$62,4I_{bf} + 2930$

I_1 : Corriente mínima de falla a la cual las ecuaciones de la TABLA N° 2.5 pueden ser utilizadas. Es el nivel mínimo de corriente de falla de contacto, que genera la corriente de arco suficiente para producir disparo instantáneo.

I_2 : Rango de interrupción del interruptor automático.

Para calcular la corriente de falla de contacto I_1 , es necesaria la corriente de falla del Arco Eléctrico I_t , la cual se puede leer en una curva de tiempo-corriente del interruptor automático y corresponde al valor de corriente de disparo instantáneo. Si la corriente de

disparo instantáneo no está disponible, se usa 10 veces la corriente nominal del interruptor automático como se muestra en la Fig. 2.1 extraída de la norma IEEE 1584 (1). En interruptores de menos de 100A se toma como valor de $I_t = 1300A$. Donde la unidad de disparo LS ha sido usada, I_t es la corriente de pico del tiempo corto.

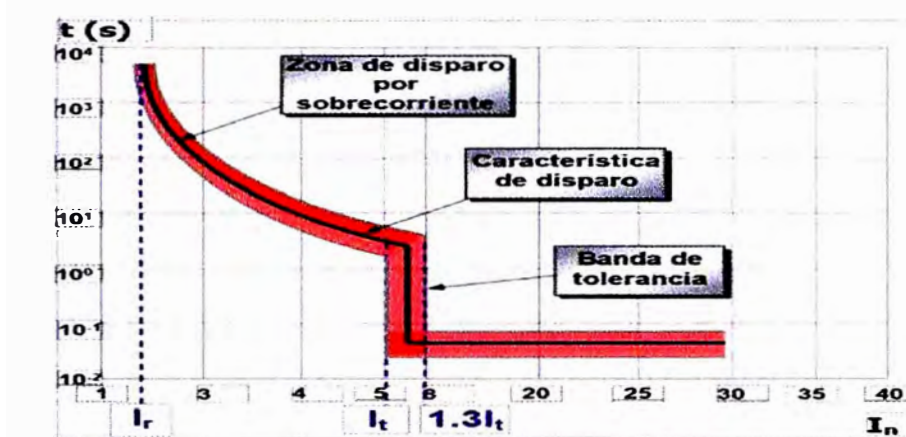


Fig. 2.1 Característica típica de curva tiempo-corriente de interruptores.

Los tipos de Interruptores son los siguientes:

- MCCB: Interruptor automático de caja moldeada.
- ICCB: Interruptor automático de caja aislada.
- LVPCB: interruptor automático de potencia para baja tensión.

Los tipos de unidades de disparo son:

TM: Termo magnético.

M: Magnético.

E: Electrónico, tiene tres características que pueden ser usados separadamente o en combinación:

- L: Tiempo Largo
- S: Tiempo cortó
- I: Instantáneo.

TM: Característica magneto térmicos, en condiciones de cortocircuito instantáneamente, sin demora intencional. Por debajo de la corriente de disparo instantáneo, tienen un retraso de tiempo largo establecido para proteger a los conductores, mientras que permite los picos de corriente momentánea, como para el arranque del motor o transformador. En muchos casos no tienen el lado instantáneo ajustable.

M: Magnético (sólo instantánea) unidades de control se utilizan para la protección contra cortocircuitos solamente, por lo general en circuitos de motor. No tienen ninguna característica de mucho tiempo y no se disparará por debajo de la corriente de disparo instantáneo, que suele ser un ajuste regulable.

E: unidades de control electrónicas tienen tres características que pueden ser utilizadas por separado o en combinación, (L) de mucho tiempo, (S) de corta duración y (I) instantánea. Una unidad de disparo puede ser designado LI en sus manifestaciones, de mucho tiempo e instantánea. Otras denominaciones comunes son LS y LSI.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO SEGÚN NFPA70E

3.1. Resumen.

La norma NFPA se preocupa por la seguridad en el trabajo y en ella menciona el EPP requerido para minimizar los riesgos en ciertos trabajos.

3.2. Objetivo.

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar las recomendaciones que menciona la norma NFPA 70E para la seguridad en el trabajo, los diferentes equipos de protección personal a utilizar en conveniencia de mitigar los riesgos del Arco Eléctrico y las fronteras de proximidad que se establecen en la norma.

3.3. Alcance.

La NFPA 70E es la norma de Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo y tiene el propósito para que la usen empleadores y empleados (4).

El método desarrollado en esta norma incluye las formulas propuestas por Lee (Desarrolladas en el capítulo anterior), las desarrolladas por Doughty/Neal (5), el empleo de estas ecuaciones aumenta los rangos en los que el método se puede utilizar además menciona los requisitos de seguridad eléctrica para los lugares de trabajo de los empleados que son necesarios para la seguridad practica de ellos en sus empleos.

Esta norma incluye lo siguiente:

- Los conductores y equipos eléctricos instalados dentro o en edificios u otras estructuras, incluyendo casas móviles y otras propiedades como patios, estacionamiento y subestaciones industriales.
- Los conductores que conectan la instalación a una fuente de suministro de electricidad.
- Otros conductores externos a la propiedad.

3.4. Definiciones.

- NFPA 70E: *National Fire Protection Asociation*, el cual se encarga de velar la seguridad en los trabajos eléctricos.

- Seguridad Eléctrica: Actividades que tienen por objetivo reducir los riesgos eléctricos.
- Empleador: Persona natural o jurídica que contrata a una persona.
- Empleado: Persona natural o jurídica que brinda servicios al empleador.
- Aparatación eléctrica al aire: Equipamiento eléctrico al aire libre.
- Aparatación eléctrica en lugares cerrados: Equipamiento eléctrico en cubículos como celdas eléctricas, tableros, *switchgear*, Centro de Control de Motores y otros.

3.5. Procedimiento de Cálculo de Riesgo Eléctrico Según NFPA 70E.

El estándar de la NFPA 70E muestra lo siguiente:

3.5.1. Desarrollo.

La NFPA 70E muestra los siguientes apartados en relación al desarrollo de la seguridad, los cuales se pretenden tomar con la mayor importancia:

NFPA 70E (sección 130.3 B): La ropa de protección para la aplicación con el análisis de peligro de arco eléctrico: Donde ha sido determinado que el trabajo se realizara dentro de la frontera de protección del Arco Eléctrico, uno de los siguientes métodos deberá de ser usado para la selección de la ropa de protección y del equipo de protección personal.

- a) Análisis de energía incidente: Este análisis determinará la energía incidente a la cual el trabajador estará expuesto ($\frac{cal}{cm^2}$) y será documentada al empleador.
- b) Categorías de Riesgo: De acuerdo a los requerimientos de la TABLA N° 3.2 que se muestra más adelante.

NFPA 70E (Sección 130.7) “Equipo de Protección Personal y otros”

- a) General: “A los empleados que trabajan en áreas donde hay peligros eléctricos, se les deberá proveer y deberán usar, equipo de protección que este diseñado y construido para la parte específica del cuerpo que se va a proteger y para el trabajo a realizar.

Cuando la energía incidente excede los $40 \frac{cal}{cm^2}$ en la distancia de trabajo, se dará un gran énfasis a trabajar sin energía, antes de trabajar dentro de la frontera de límite de aproximación de exposición eléctrica a los conductores o partes del circuito energizado.

- b) Cuidado del Equipo: El equipo de protección se mantendrá en áreas seguras y confiables, además el equipo deberá inspeccionarse visualmente antes de usarlo.
- c) Equipo de Protección Personal (EPP):
 - General: Todas las partes del cuerpo dentro de la frontera de protección deberán ser protegidas.

- **Movimiento y visibilidad:** Cuando la ropa resistente a la llama es usada para proteger al empleado, deberá de cubrir toda la ropa que se puede quemar y permitir el movimiento y la visibilidad.
- **Cabeza, cara, cuello y mentón (área de protección de la cara):** Los empleados deberán vestir protección no conductiva en la cabeza, siempre que exista peligro de heridas en la cabeza causadas por choque eléctrico o quemaduras debidas al contacto con partes energizadas o por objetos que vuelen como resultado de una explosión eléctrica.
- **Protección de los Ojos:** Los empleados deberán vestir equipo de protección para los ojos, siempre que exista peligro de heridas causadas por arcos eléctricos, relámpagos o por objetos que vuelven como resultado de una explosión eléctrica.
- **Protección de cuerpo:** Los empleados deberán vestir ropa retardante a la llama siempre que exista la posibilidad de exposición a relámpago de Arco Eléctrico por encima del umbral del nivel de energía incidente para una quemadura de segundo grado $5\text{J}/\text{cm}^2$ ($1.2\text{cal}/\text{cm}^2$)

Esta ropa puede ser suministrada como un traje de arco eléctrico con camisa y pantalones, como overoles, una combinación de chaqueta y pantalón o para una máxima protección, como overol y chaqueta.

- **Protección de las manos y brazos:** "...Como se muestra abajo, deberá de proveer acorde con los siguiente puntos:
 - i. **Protección de choque:** Empleados deberán usar guantes de caucho con cuero protector donde hay peligro de daño en la mano por choque.
 - ii. **Protección por Arco:** La protección de las manos y los brazos se deberá vestir cuando haya posibilidad de exposición a quemaduras por Arco Eléctrico.
 - iii. **Mantenimiento y Uso:** El equipo de protección personal deberá ser mantenido con seguridad y ser confiable. El equipo aislado deberá ser inspeccionado antes de cada día de uso e inmediatamente después de haber recibido energía incidente que pueda haber causado daño. Además el equipo de protección personal deberá ser sujeto a pruebas eléctricas periódicas.
- **Protección de Pies:** Los zapatos o botas dieléctricas serán requeridos contra la protección de tensiones de toque y de paso. Las suelas aisladas no tienen el propósito de ser utilizadas como protección eléctrica principal.
- **Estándares de equipo de protección personal:** los equipos de protección personal deberán ajustarse a las normas dadas en la siguiente TABLA N° 3.1

TABLA N° 3.1 Normas internacionales para equipos de protección personal

Tipo de Protección	Norma Internacional
Protección de la cabeza	<i>ANSI Z89.1, Requirements for Protective Headwear for Industrial Workers, 1997.</i>
Protección de ojos y cara	<i>ANSI Z87.1, Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection, 1989.</i>
Guantes	<i>ASTM D 120, Standard Specification for Rubber Insulating Gloves, 1995.</i>
Mangas	<i>ASTM D 1051, Standard Specification for Rubber Insulating Sleeves, 1995.</i>
Guantes y mangas	<i>ASTM F 496, Standard Specification for In-Service Care of Insulating Gloves and Sleeves, 1997</i>
Protectores de cuero	<i>ASTM F 696, Standard Specification for Leather Protectors for Rubber Insulating Gloves and Mittens, 1997.</i>
Calzado	<i>ASTM F 1117, Standard Specification for Dielectric Overshoe Footwear, 1993.</i> <i>ANSI Z41, Standard for Personnel Protection, Protective Footwear, 1991.</i>
Inspección visual	<i>ASTM F 1236, Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products, 1996</i>
Ropa/Vestimenta	<i>ASTM F 1506, Standard Specification for Protective Wearing Apparel for Use by Electrical Workers When Exposed to Momentary Electric Arc and Related Thermal Hazards, 1998</i>

- Selección de equipo de protección personal para diversas tareas: Cuando se hace selección en lugar de análisis de peligro de Arco Eléctrico se deberá utilizar la siguiente TABLA N° 3.2, la cual realiza una selección del tipo de equipo de protección personal para los diferentes tipos de riesgos relacionados a condiciones especiales de maniobra, referencia (4) y (7).

TABLA N° 3.2 Clasificación de Categoría de Riesgo.

Tarea¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Paneles de distribución, Vn<240V.			
Operación de interruptores automáticos (IA) o conmutadores con fusibles con cubiertas instaladas.	0	NO	NO
Operación de interruptor automático (IA) o conmutadores con fusibles con las cubiertas retiradas	0	NO	NO
Trabajo en partes energizadas, incluyendo la prueba de tensión.	1	SI	NO
Retiro/Instalación de interruptores automáticos (IAs) o conmutadores con fusibles.	1	SI	NO
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes desnudas energizadas).	1	NO	SI
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes desnudas energizadas)	0	NO	NO
Trabajos sobre conductores y partes de circuitos energizados que alimentan directamente al tablero eléctrico	1	SI	SI
Paneles de distribución o tableros de distribución 240V<Vn<600V (con interruptores automáticos en caja moldeada o caja aislada).			
Operación de interruptores automáticos (IA) o conmutadores con fusibles con cubiertas instaladas.	0	NO	NO
Operación de interruptor automático (IA) o conmutadores con fusibles con las cubiertas retiradas	1	NO	NO

¹se asume que el equipo esta energizado y que el trabajo se realiza dentro de la frontera de protección contra arco.

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Trabajo en partes energizadas, incluyendo la prueba de tensión.	2	SI	SI
Centros de Control de Motores clase 600V (CCM).			
Operación de interruptor automático (IA), conmutadores con fusibles o arrancadores, cerradas las puertas del CCM.	0	NO	NO
Lectura de un medidor de panel mientras que se opera el conmutador del medidor.	0	NO	NO
Operación de interruptor automático (IA), o conmutadores con fusibles o arrancadores, abiertas las puertas del CCM.	1	NO	NO
Trabajo en partes energizadas, incluyendo la prueba de tensión.	2	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a 120 V o menos.	0	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a >120V	2	SI	SI
Inserción o instalación de unidades de arrancadores en CCM	3	SI	NO
Instalación de tierras temporales, después de la prueba de tensión.	2	SI	NO
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes energizadas desnudas).	2	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes energizadas desnudas).	1	NO	NO
Trabajos sobre conductores y partes de circuitos energizados que alimentan directamente al tablero eléctrico	2	SI	SI

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Equipo de maniobra clase 600 V (con interruptores automáticos de potencia o conmutadores con fusibles).			
Operación de interruptores automáticos (IA) o conmutadores con fusibles, cerradas las puertas del cubículo.	0	NO	NO
Lectura del medidor del panel mientras que se opera el conmutador del medidor.	0	NO	NO
Operación de IA o conmutador con fusibles, abiertas las puertas del cubículo.	1	NO	NO
Trabajo en partes energizadas, incluyendo la prueba de tensión.	2	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a 120 V o menos.	0	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas >120V	2	SI	SI
Inserción o remoción de IAs de cubículos, puertas abiertas y puertas cerradas	4	NO	NO
Instalaciones de tierras temporales después de la prueba de tensión.	2	SI	NO
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes energizadas desnudas).	4	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes energizadas desnudas).	2	NO	NO
Otra clase 600 V (277 V a 600 V, nominal) Equipos.			
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes energizadas desnudas).	2	NO	NO

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes energizadas desnudas).	1	NO	NO
Trabajo en partes energizadas, incluyendo pruebas de tensión.	2	SI	SI
Instalaciones de tierras temporales después de la prueba de tensión.	2	SI	NO
Medidores (kW-hora, a tensión y corriente del primario).	2	SI	NO
Retiro o instalación de canaletas o bandeja de cables.	1	NO	NO
Retiro o instalación de la cubierta de equipos misceláneos.	1	NO	NO
Trabajo en partes energizadas incluyendo la prueba de tensión	2	SI	SI
Instalación de tierras temporales después de la prueba de tensión	2	SI	NO
Arrancadores de motores NEMA E2 (contacto con fusibles), 2.3 kV a 7.2 kV			
Operación del contacto estando cerradas las puertas del arrancador.	0	NO	NO
Lectura del medidor del panel mientras se opera el conmutador del medidor.	0	NO	NO
Operación de contacto estando abiertas las puertas del arrancador.	2	NO	NO
Trabajo en partes energizadas incluyendo la prueba de tensión.	4	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a 120 voltios 0 menos	0	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a >120V.	3	SI	SI

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Inserción o retiro de arrancadores de cubículos, estando las puertas abiertas o cerradas	4	NO	NO
Instalación de tierras temporales después de la prueba de tensión	3	SI	NO
Retiro de cubiertas energizadas (para exponer partes desnudas energizadas)	4	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes desnudas energizadas)	3	NO	NO
Inserción o retiro de arrancadores desde los cubículos construidos que son resistentes al Arco Eléctrico que hayan sido probados de acuerdo con el estándar IEEE C37.20.7 a puertas cerradas únicamente.	0	NO	NO
Tableros de potencia, <i>metal enclosed</i>, 1 kV a 38kV			
Prueba de termografía infrarroja y otras pruebas de no contacto fuera de la frontera de aproximación restringida.	3	NO	NO
Operación de interruptores automáticos (IA) o conmutador con fusibles estando cerradas las puertas del tablero eléctrico.	2	NO	NO
Lectura del medidor de panel mientras que se opera el conmutador del medidor	0	NO	NO
Operación de interruptores automáticos (IA) o conmutador con fusibles estando abiertas las puertas del tablero eléctrico.	4	NO	NO
Trabajo en partes energizadas incluyendo la prueba de tensión.	4	SI	SI
Trabajo en circuitos de control con partes	2	SI	SI

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
expuestas energizadas a 120 V 0 menos.			
Trabajo en circuitos de control con partes expuestas energizadas a >120V.	4	SI	SI
Inserción o retiro de interruptores automáticos (IAs) de los cubículos, estando las puertas abiertas o cerradas	4	NO	NO
Instalación de tierras de seguridad después de la prueba de tensión	4	SI	NO
Retiro de cubiertas atornilladas (para exponer partes desnudas energizadas)	4	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes desnudas energizadas)	3	NO	NO
Apertura de compartimientos de transformador de tensión o transformador de potencia de control	4	NO	NO
Otros Equipos de 1kV hasta 38kV.			
Operación de conmutador de cubículos a prueba de Arco Eléctrico, aprobados según el estándar IEEE C37.20.7, puertas cerradas únicamente.	0	NO	NO
Operación de conmutador, puertas cerradas.	2	NO	NO
Trabajo en partes energizadas, incluyendo prueba de tensión.	4	SI	SI
Retiro de cubiertas energizadas (para exponer partes desnudas energizadas).	4	NO	NO
Apertura de cubiertas con bisagras (para exponer partes desnudas energizadas).	3	NO	NO
Operación de conmutador exterior de desconexión (operado con pértiga).	3	SI	SI

Tarea ¹	Categoría de Riesgo	Guantes (Vn)	Herramientas (Vn)
Operación de conmutador exterior de desconexión (operado con gatillo desde el suelo).	2	SI	NO
Medición de aislamiento del cable, en cámara de inspección u otro espacio confinado.	4	SI	NO
Medición de aislamiento del cable al aire libre.	2	SI	NO

- Matriz de ropa de protección y de equipo de protección personal: Una vez que la categoría Riesgo ha sido identificada de la TABLA N° 3.2. La TABLA N° 3.3 lista los requerimientos para la ropa y otros equipos de protección personal con base en los números de Categoría Riesgo de 0 a 4 obtenidos de la TABLA N° 3.2. Esta ropa y equipo se deberán utilizar cuando se trabaje dentro de la frontera de protección contra Arco Eléctrico, probadas bajo los estándares de resistencia de materiales (6)

TABLA N° 3.3 Matriz de Ropa de Protección según Categoría de Riesgos.

Categoría de Riesgo.	Descripción de la Ropa	Nivel mínimo de protección al arco requerido (cal/cm ²)
0	Materiales no fundentes, inflamables (algodón no tratado, lana, seda, o combinaciones de estos materiales) con un peso de la tela mínima de 4.5 oz/yd ² .	N/A
1	Camisa RLL y pantalones RLL u overol RLL	4
2	Ropa interior de algodón - pantaloncillos corto y de manga corta, más camisa RLL y pantalones RLL	8
3	Ropa interior de algodón más camisa RLL y pantalones RLL más overol o ropa interior de algodón más dos overoles RLL	25
4	Ropa interior de algodón más camisa RLL y pantalones RLL más vestido de arco multicapas (3 o más)	40

Leyenda de la anterior TABLA N° 3.3:

RLL: Retardante a la llama producida por el Arco Eléctrico.

3.5.2. Limitaciones.

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

Esta norma no incluye lo siguiente:

- Instalaciones en barcos, naves acuáticas, material rodante ferroviario, aviones, o vehículos automotores diferentes de casa móviles y vehículos de recreo.
- Instalaciones subterráneas en minas.
- Instalaciones ferroviarias para la generación, transformación, transmisión, o distribución, de la energía eléctrica usada exclusivamente para el funcionamiento del material rodante o las instalaciones utilizadas exclusivamente para señalización y comunicaciones.
- Instalaciones de equipos de comunicaciones bajo el control exclusivo de las compañías de comunicaciones, situadas a la intemperie o dentro de edificios utilizados exclusivamente para dichas instalaciones.
- Instalaciones, bajo el control exclusivo de las compañías de electricidad, destinadas a comunicaciones o medición; o para generación, control, transformación, transmisión y distribución, de energía eléctrica, localizadas en edificios utilizados exclusivamente por compañías de servicios para tales propósitos o situadas al aire libre en lugares propios o arrendados por la compañía o a lo largo de carreteras, calles, caminos y otros que sean públicos o al aire libre en propiedades privadas mediante derecho de paso.

Las limitaciones de los diferentes métodos de cálculo son resumidos en la siguiente TABLA N° 3.4.

TABLA N° 3.4 Limitaciones de los diferentes métodos de cálculo.

Fuente	Limitaciones/Parámetros
Ralph Lee paper	Cálculo de la frontera de protección contra Arco Eléctrico en instalaciones al aire libre, conservativo sobre 600V y se vuelve más conservativo a medida que aumenta la tensión.
Doughty/Neal paper	Cálculo de energía incidente para arcos trifásicos o sistemas de 600V o menores, aplicado a corrientes de cortocircuito entre 16kA-50kA.
Ralph Lee paper	Cálculo de energía incidente para arcos trifásicos en sistemas de 600V o mayores al aire libre, se vuelve más conservador al incrementarse la tensión.
Estándar IEEE 1584	Calculo de energía incidente y frontera de protección contra Arco Eléctrico para: 208V-15000V; sistemas trifásicos; 50Hz o 60Hz; 700A-106000A de corriente de cortocircuito: 13 mm-152mm de separación entre barras o conductores.

3.5.3. Procedimiento.

En el procedimiento de cálculo de los riesgos por Arco Eléctrico mencionados en la NFPA 70E se hace referencia a lo siguiente:

a) Límites de Aproximación.

Preparación para aproximación: El mantener una distancia segura de aproximación a los conductores o partes de circuitos eléctricos energizados expuestos, es un medio efectivo para mantener la seguridad. En la medida en que disminuye la distancia entre persona y conductores o partes de circuitos energizados expuestos, aumenta el potencial de accidentes eléctricos.

b) Distancia de Seguridad de aproximación para personas no calificadas.

Las personas no calificadas están seguras cuando ellas mantienen la distancia a los conductores y partes de circuitos energizados expuestos, incluyendo el objeto conductivo más largo que se esté manipulando, de tal manera que ellos no puedan tener contacto o entrar en la distancia de aislamiento de aire especificada para los conductores o partes de circuitos eléctricos energizados. Esta distancia segura de aproximación es el límite de

aproximación. Ellos no deben cruzar la frontera de protección contra Arco Eléctrico a menos que estén cubiertos con el EPP apropiado y estén en estricta supervisión calificada.

c) Distancia de Seguridad de aproximación para personas calificadas.

Determinar la frontera de protección contra Arco Eléctrico y si va a traspasar la frontera se deberá utilizar equipo apropiado de protección contra el Arco Eléctrico.

Para que una persona traspase la frontera límite de aproximación y entre en el espacio limitado debe estar calificado para desempeñar el trabajo o la tarea.

Para traspasar la frontera de aproximación restringida y entrar en el espacio restringido, la persona calificada debe:

- Tener un plan que este documentado y aprobado por el gerente autorizado.
- Utilizar el EPP apropiado para trabajar cerca de conductores o partes de circuitos energizados expuestos y con valores nominales para los niveles de tensión y energía relacionados.
- Estar seguro de que ninguna parte del cuerpo podrá entrar en el espacio prohibido.
- Minimizar el riesgo debido a movimientos involuntarios manteniendo el cuerpo lo más posible fuera del espacio restringido y utilizando en el espacio solo partes del cuerpo tan protegidas como sea necesario para ejecutar el trabajo.

Traspasar la frontera de aproximación prohibida y entrar en el espacio prohibido, se considera lo mismo que hacer contacto con conductores y partes de circuitos energizados. La persona calificada debe:

- Recibir el entrenamiento específico para trabajar en conductores y partes de circuitos energizados.
- Tener un plan documentado aprobado que justifique la necesidad de trabajar tan cerca.
- Realizar el análisis de riesgo (ART y ATS) aprobados.
- Utilizar EPP para trabajar en conductores y partes de circuitos energizados expuestos, y con valores nominales para los niveles de tensión y energía relacionados.

Para un mayor entendimiento se presenta la siguiente Fig. 3.1 la cual tiene como fuente la norma NFPA 70E (4).

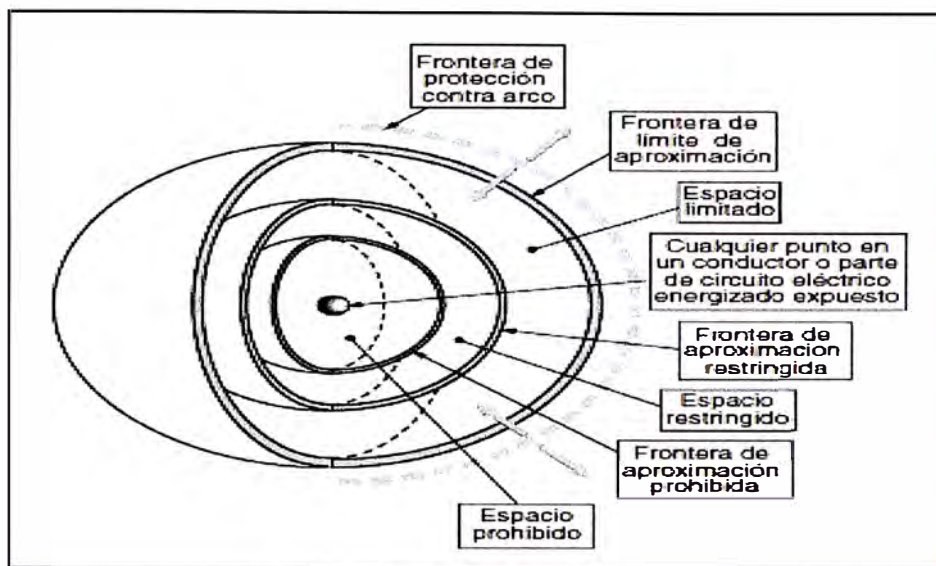


Fig. 3.1 Esquema de Límites de Proximidad

3.5.4. Cálculo de Límite de Protección contra Flameo.

La corriente de cortocircuito trifásica de una falla trifásica en los terminales de un transformador se calcula con la ecuación:

$$I_{sc} = \left(\frac{\text{MVA base} \times 10^6}{\sqrt{3} \times V} \right) \times \left(\frac{100}{Z\%} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

I_{sc} : Corriente de cortocircuito por falla trifásica en terminales del transformador (A).

Z%: Impedancia en porcentaje, en la potencia MVA del transformador.

V: Nivel de Tensión (V).

La capacidad de cortocircuito en un arco trifásico, se calcula mediante la ecuación:

$$\text{MVA}_{bf} = \sqrt{3} \times V \times I_{sc} \quad (3.2)$$

Donde:

MVA_{bf} : Potencia de cortocircuito en el punto de la falla.

3.5.5. Distancia de Frontera de Protección contra el Arco Eléctrico.

La distancia medida desde la fuente en mm, a la cual se tendrá quemaduras curables de segundo grado, se describe con las ecuaciones:

$$D_c = 496,18 \times \sqrt{\text{MVA}_{bf} \times t} \quad (3.3)$$

$$D_c = 2218,98 \times \sqrt{MVA \times t}$$

(3. 4)

D_c : Distancia de la fuente del arco, a la cual se tendrán quemaduras curables de segundo grado (mm).

MVA_{bf} : Potencia de cortocircuito en el punto de la falla.

MVA: Potencia del transformador. Para transformadores de potencia menor de 0,75MVA, multiplicar su potencia por un factor de 1,25.

t: Tiempo de exposición al Arco Eléctrico en segundos.

El tiempo de despeje para un fusible limitador de corriente es aproximadamente 1/4 ciclo o 0,004 segundos. El tiempo de despeje de un interruptor automático de 5 kV y 15 kV es aproximadamente 0,1 segundos o 6 ciclos. Esto se puede desagregar de la manera siguiente: tiempo real del interruptor (aproximadamente 2,0 ciclos), más el tiempo de operación del relé de aproximadamente 1,74 ciclos, más un margen de seguridad adicional de 2 ciclos, que da un tiempo total de aproximadamente 6 ciclos.

3.5.6. Cálculos de Energía incidente.

a) Energía incidente a tensiones menores o iguales a 600V.

Las siguientes ecuaciones pueden predecir la energía incidente de arcos trifásicos (8). Los resultados pueden no representar el peor de los casos en todas las situaciones, es necesario que las ecuaciones se usen dentro de las limitaciones indicadas en la definición de las variables. Los parámetros requeridos para hacer los cálculos son los siguientes:

➤ I_f : la máxima corriente de falla trifásica de contacto, disponible en el equipo y el nivel mínimo de corriente al cual el arco eléctrico será auto-sostenido. Para sistemas de 480V se acepta que el mínimo nivel para un arco auto-sostenible es 38% de la corriente de falla trifásica de contacto disponible. Los niveles más altos de energía incidente, se pueden dar para estas corrientes bajas debido a que el dispositivo de protección puede tomar varios segundos o incluso minutos en abrir. Los cálculos de la energía incidente se deben hacer para las dos corrientes y el resultado del modelo será la energía incidente más alta. El rango para la cual estas ecuaciones son aplicables es de 16KA a 50KA.

t_A : el tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba en perspectiva de la localización del arco) a la máxima corriente de cortocircuito y al nivel mínimo al cual la falla será auto-sostenida.

D_a : La distancia del trabajador al arco, desde la perspectiva del lugar donde se desarrolla la tarea. El modelo es aplicable para distancias al arco mayores a 455 mm.

- **Cálculos de Energía incidente al aire libre:**

Mediante la siguiente ecuación se calcula la energía incidente al aire libre.

$$E_{MA} = 629921,86 \times D_A^{-1,9593} \times t_A \times (0,0016 \times I_f^2 - 0,0076 \times I_f + 0,8938) \quad (3.5)$$

Donde:

E_{MA} : Energía incidente máxima al aire libre en cal/cm².

D_A : Distancia al conductor que puede originar el arco eléctrico en mm.

t_A : Duración del arco en segundos (s).

I_f : Corriente de cortocircuito en kA. (16kA-50kA)

- **Calculo de energía incidente en Lugares Cerrados:**

Mediante la ecuación se calcula la energía incidente en lugares cerrados de dimensiones máximas de 508mm en cada uno de sus lados:

$$E_{MB} = 122079,1 D_b^{-1,4738} \times t_A \times (0,0093 \times I_f^2 - 0,3453 \times I_f + 5,96) \quad (3.6)$$

Donde:

E_{MB} Energía incidente máxima en un cubículo de 20" en cada lado, (cal/cm²).

D_b : Distancia al conductor que puede originar el arco eléctrico en mm.

t_A : Duración del arco en segundos (s).

I_f : Corriente de cortocircuito en kA (16kA-50kA.)

Esta ecuación es aplicable a emanaciones de Arco Eléctrico desde *switchgear*, Centro de control de Motores u otro equipamiento encerrado.

b) Calculo de energía incidente a tensiones mayores de 600V.

Los parámetros requeridos para hacer estos cálculos son los siguientes:

- La máxima corriente de falla franca trifásica disponible en el equipo.
- El tiempo total de despeje del dispositivo de protección (aguas arriba en perspectiva a la localización del arco) a la máxima corriente de cortocircuito.
- La distancia del arco a la fuente.
- La tensión del sistema.

$$E = \frac{511611,88 \times I_f \times V \times t_A}{D^2} \quad (3.7)$$

Donde:

E: Energía incidente máxima en cal/cm².

D: Distancia del arco a los electrodos en mm.

t_A : Duración del arco en segundos (s).

I_{I_f} Corriente de cortocircuito (kA).

V: Nivel de Tensión del sistema (kV).

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DE SOFTWARE EN CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO

4.1. Resumen.

El presente capítulo muestra las características que el programa computacional ETAP puede realizar en el análisis de Arco Eléctrico en base a las metodologías de cálculo de la IEEE 1584 y la NFPA 70E.

4.2. Objetivo.

Mostrar las bondades comunes de la utilización de programas computacionales como el ETAP, DigSilent, Arcad entre otros en el análisis cualitativo y cuantitativo del riesgo de Arco Eléctrico.

4.3. Alcance.

Describir las características del módulo de análisis de Arco Eléctrico *del software* de simulación de análisis de potencia ETAP, su

4.4. Definiciones.

Software: Soporte lógico de un sistema informático.

ETAP: Software de ingeniería eléctrica para análisis de sistemas de potencia, sus siglas en ingles son "*Electrical Transient and Analysis Program*"

4.5. Software ETAP.

ETAP, programa de análisis y transitorios eléctricos, es un *software* de simulación de sistemas de potencia, y en él se pueden realizar estudios de cálculos de flujo de potencia, cortocircuito, coordinación de protección, arranque de motores, cálculo de conductores, diseño de sistemas de Puesta a Tierra, análisis de Arco Eléctrico y *otros*.

ETAP Arco Eléctrico (módulo de análisis de Arco Eléctrico) estima en forma automática la energía incidente liberada durante el proceso de arco en fallas trifásicas y determina los límites de protección requeridos según las condiciones de trabajo (distancia de trabajo, equipo, tiempo de despeje de corriente de falla). El módulo permite diseñar sistemas eléctricos de potencia seguros y al mismo tiempo cumplir con las regulaciones OSHA

(Occupational Safety and Health Administration) por la aplicación de la normativa NFPA 70E o IEEE 1584 para cálculos del Arco Eléctrico (9).

El análisis para el cálculo de cortocircuitos trifásicos se desarrolla tomando en cuenta la norma ANSI/IEEE o IEC lo cual también se puede obtener del mismo software ETAP.

Asimismo, se determina el equipo de protección personal (EPP) requerido, el rango de energía incidente de Arco Eléctrico según el enfoque más ajustado a los límites de cercanía a partes energizadas para protección contra *shocks* de la NFPA 70E.

El módulo de análisis de Arco Eléctrico de ETAP contiene distancias típicas de equipamientos y el factor X (mostrado en el capítulo II) según la IEEE 1584 lo cual ya es una ventaja para el cálculo y análisis. Se puede seleccionar el equipamiento que es representado por una barra, este equipamiento puede ser un CCM (Centro de Control de Motores), *Switchgear* o equipamiento al aire libre o en un lugar cerrado. Una vez seleccionado el equipamiento, se elige los valores típicos de separación entre barras o conductores y frontera de protección contra el Arco Eléctrico mediante la opción incorporada de *Typical Data* como muestra la siguiente Fig. 4.1, los valores típicos de frontera es en base a la NFPA 70E.

Fig. 4.1 Editor de barras del software ETAP.

Su exactitud ha sido reconocida por importantes fabricantes de ropa para protección personal contra llamas como *Oberon Company*, *Chicago Protective Apparel* y otros.

4.6. Metodología Del Cálculo.

El *software* ETAP hace referencia a dos metodologías de cálculo:

4.6.1. Metodología según Estándar IEEE 1584.

ETAP emplea los modelos empíricos del estándar IEEE-1584 para los niveles de tensión en el rango de 208V-15kV, el modelo teórico derivado de la formulación matemática de Ralph Lee se utiliza para los niveles de tensión superiores a los 15 kV y empleado dentro del rango de 0.7 – 106 kA de corrientes de falla, como puede apreciarse en el estándar IEEE-1584 según el Capítulo II.

Para sistemas aterrados y aislados (de alta o baja resistencia) las fallas en barras son consideradas con sus tensiones nominales para el rango de 208V-15kV.

El módulo del Arco Eléctrico emplea la corriente de falla del módulo del cortocircuito de ETAP y estos valores trifásicos de la corriente de falla son los calculados para medio Ciclo, dependiendo del nivel de tensión y del tipo de equipo, ETAP determina las corrientes de falla. Para el caso de niveles de tensión mayores a 15 kV, la corriente de falla es igual a la corriente de falla calculada.

4.6.2. Metodología según NFPA 70E.

ETAP utiliza el rango de falla que la NFPA 70E considera, la cual es de 16-50kA.

El cálculo de la energía incidente es válido para los niveles de tensión debajo de 600V y solamente para equipos expuestos al aire abierto en tensiones mayores a 600 voltios.

Es fundamental comentar que este método no considera el tipo de equipo ni los factores de distancia.

4.7. Análisis de los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con los obtenidos por otros programas y ecuaciones como los de IEEE IAS 45 "Prediciendo la Energía de los Incidentes para Manejar los Riesgos de Arcos Eléctricos en Sistemas de Distribución de Potencia de 600 V", los cuales son muy satisfactorios en el reconocimiento del cálculo del riesgo.

Igualmente, en base a los resultados obtenidos, se determina la Categoría de Riesgo, que permitirá posteriormente seleccionar el equipo de protección personal adecuada.

4.8. Características.

El módulo de análisis de Arco Eléctrico de ETAP presenta las siguientes características del programa:

- No tiene limitaciones por nivel de tensión ni por kA-ciclos.

- Maneja variables como la distancia y tensión de alimentación, que otro *software* no considera ya que solo aplican a ciertos niveles de tensión y rangos de corriente de falla.
- Cubre la posibilidad de fallas al aire libre y fallas confinadas en cubículos (lugares cerrados) y cuartos eléctricos, con la incorporación de factores de corrección en las formulas, determinados mediante ensayos de laboratorio.
- Brinda una tabla resumen de reporte de análisis de Arco Eléctrico para todas las barras que se ha simulado las fallas trifásicas.
- Calcula las corrientes de cortocircuito trifásicas en múltiples barras en el sistema que se está simulando y se puede calcular las fallas de cortocircuito en todas las barras.
- Determina de forma instantánea los límites de frontera de aproximación de protección de Arco Eléctrico, prohibidas, restringidas de acuerdo con la norma NFPA 70E.
- Determina la frontera de protección contra el Arco Eléctrico como una función de la duración del arco para configuraciones abiertas y cerradas.
- Determina la energía incidente expuesta como una función de la distancia.
- Determina la energía incidente expuesta como una función de locación del Arco Eléctrico.
- Determina la energía incidente expuesta al aire libre.
- Determina la energía incidente expuesta en lugares cerrados.
- Se puede adaptar a una impresora para imprimir las etiquetas a utilizar en los diferentes equipos de una planta.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO EN EL PROYECTO MINA CONSTANCIA

5.1. Introducción.

El Perú está pasando actualmente por una solidez económica, teniendo en los últimos 10 años un crecimiento económico alrededor de 5%, esto es en gran medida gracias al aporte de la construcción y operación de medianos y grandes proyectos mineros a nivel nacional como: Minera Yanacocha, Minera Antamina, Minera *Southern Perú*, Minera Cerro Verde, Minera Barrick, Minera Bayovar, Minera *Gold Fields*, Minera el Brocal, Minera volcán, Minera Shougang y otros.

Actualmente la compañía *Hudbay Minerals*, en sus planes de inversión a nivel mundial, se encuentra realizando la construcción de la Minera Constancia, ubicada en el Departamento de Cusco.

5.2. Generalidades.

El proyecto Minero de Constancia lo conforman las siguientes áreas:

- Chancadora: Zona de la mina donde se deposita el mineral extraído para que se pueda realizar el proceso de chancado con finalidad de reducir los diámetros para pasar a la zona de molienda.
- Molienda: Zona de la mina donde se encuentran los Molinos, equipos eléctricos de mayor potencia de la mina, a estos molinos les ingresa el mineral en pequeños diámetros provenientes de la Zona de Chancado.
- Flotación: Zona de la mina en donde se tiene tanques de depósitos grandes, donde por el proceso de flotación se elevan los materiales no utilizables y por deposición se obtiene el mineral cobre (Cu).
- Relaves: Zona de la mina a dónde va el material no utilizable del proceso de molienda y flotación.

- **Facilidades:** Se entiende por Facilidades todas las zonas que brindan el soporte para que se pueda dar la operación minera, entre ellas tenemos: Campamento, talleres de Grifos, talleres de mantenimiento, tajo y otros.

5.3. Objetivos.

Mostrar un análisis del riesgo por Arco Eléctrico en las zonas de Chancado y Molienda del proyecto Mina Constancia con la utilización del *Software* ETAP, donde se muestra las distintas cargas en función de su potencia, tensión nominal, equipamiento, relés de sobre corriente, interruptores de media tensión y baja tensión. Este análisis se realiza en base a los estándares IEEE 1584 y la NFPA 70E mostrados en los capítulos II y III.

5.4. Alcance.

Se aborda el análisis de Arco Eléctrico en las Zonas de Molienda y Chancado considerando el análisis al 2016 en época de máxima demanda.

El análisis de Arco Eléctrico que se desarrolla en el presente capítulo pretende mostrar el riesgo asociado al Arco Eléctrico en las instalaciones de Zona de Molienda (únicamente equipos Media Tensión) y en Zona de Chancado (equipos de Media y Baja Tensión), ambas zonas son las asociadas únicamente a la Barra B del Sistema Eléctrico de la Mina Constancia.

Las otras zonas como Flotación, Relaves, Facilidades, Planta de Molibdeno son simuladas como una carga equivalente de cada zona la cual es expresada como un motor asíncrono conectado directamente a la Barra B en 22.9kV, esto con finalidad de considerar todo el esquema unifilar de la planta minera y poner énfasis en los resultados en las Áreas de Molienda y Chancado.

5.5. Sistema Eléctrico.

El suministro de energía hacia todas las instalaciones de la planta se obtendrá para un escenario de máxima demanda a partir de la barra constancia 220kV, conectada a la red equivalente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

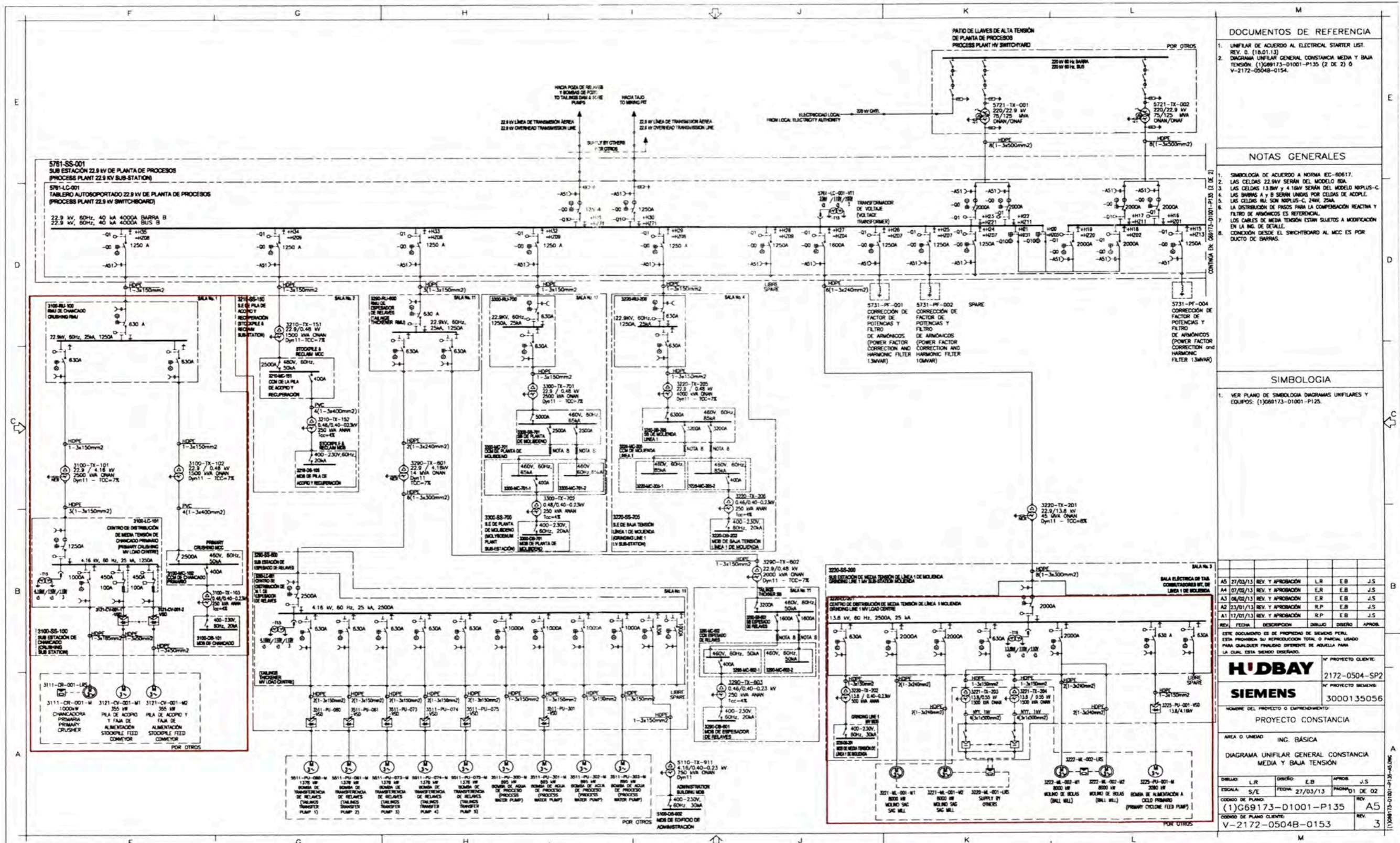
Para el equivalente de red SEIN de la Subestación - Constancia 220 kV, la evolución (10) de las potencias de cortocircuito (monofásico y trifásico) en los siguientes años se muestra en la siguiente TABLA N° 5.1:

TABLA N° 5.1 Potencias de cortocircuito en Subestación Constancia 220kV.

Año	Sc _c 1Ø MVA	Sc _c 3Ø MVA
2015	290.5	865.65
2016	293.37	874.41
2018	300	936.65
2020	320	1050

Se considera dos transformadores de 75/125 MVA, ONAN/ONAF 220/22.9kV, los cuales alimentarán a los interruptores principales de la Subestación eléctrica de 5761-SS-001 (*Process Plant 22.9 kV Sub-Station*) de las barras 576-1-LC-001A (Barra A) y 576-1-LC-001B (Barra B) en 22.9kV; Estas dos barras estarán conectadas por un interruptor de acoplamiento el que en condiciones normales deberá estar abierto, y en condiciones de falla de uno de los transformadores de 75/125 MVA este se cierra automáticamente al presentar la falla.

El sistema eléctrico de Mina Constancia se aprecia en las siguientes figuras Fig. 5.1 y Fig. 5.2, las cuales son los diagramas unifilares de la ingeniería básica del proyecto de Mina Constancia (11).



DOCUMENTOS DE REFERENCIA

1. UNIFILAR DE ACUERDO AL ELECTRICAL STARTER LIST. REV. 0. (18.01.13)
2. DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL CONSTANCIA MEDIA Y BAJA TENSION. (1)G69173-D1001-P135 (2 DE 2) 0 V-2172-0504B-0154.

NOTAS GENERALES

1. SIMBOLOGIA DE ACUERDO A NORMA IEC-60617.
2. LAS CELDAS 22.9KV SERAN DEL MODELO R5A.
3. LAS CELDAS 13.8KV Y 4.15KV SERAN DEL MODELO NORPLUS-C.
4. LAS BARRAS A Y B SERAN UNIDAS POR CELDAS DE ACOPLE.
5. LAS CELDAS R2 SON NORPLUS-C, 24KV, 250A.
6. LA DISTRIBUCION DE PASOS PARA LA COMPENSACION REACTIVA Y FILTRO DE ARMONICOS ES REFERENCIAL.
7. LOS CABLES DE MEDIA TENSION ESTAN SUJETOS A MODIFICACION EN LA ING. DE DETALLE.
8. CONEXION DESDE EL SWITCHBOARD AL MCC ES POR DUCTO DE BARRAS.

SIMBOLOGIA

1. VER PLANO DE SIMBOLOGIA DIAGRAMAS UNIFILARES Y EQUIPOS: (1)G69173-D1001-P125.

REV.	FECHA	DESCRIPCION	DISIÑO	DISIÑO	APROB.
A5	27/03/13	REV. Y APROBACION	L.R.	E.B.	J.S.
A4	07/02/13	REV. Y APROBACION	E.R.	E.B.	J.S.
A3	06/02/13	REV. Y APROBACION	E.R.	E.B.	J.S.
A2	23/01/13	REV. Y APROBACION	R.P.	E.B.	J.S.
A1	17/01/13	REV. Y APROBACION	R.P.	E.B.	J.S.

ESTE DOCUMENTO ES DE PROPIEDAD DE SIEMENS PERUL. ESTA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL. USADO PARA CUALQUIER PROYECTO DIFERENTE DE AQUEL PARA LA CUAL ESTA SIENDO DISEÑADO.

HIDBAY
SIEMENS
 N° PROYECTO CLIENTE: 2172-0504-SP2
 N° PROYECTO SIEMENS: 3000135056

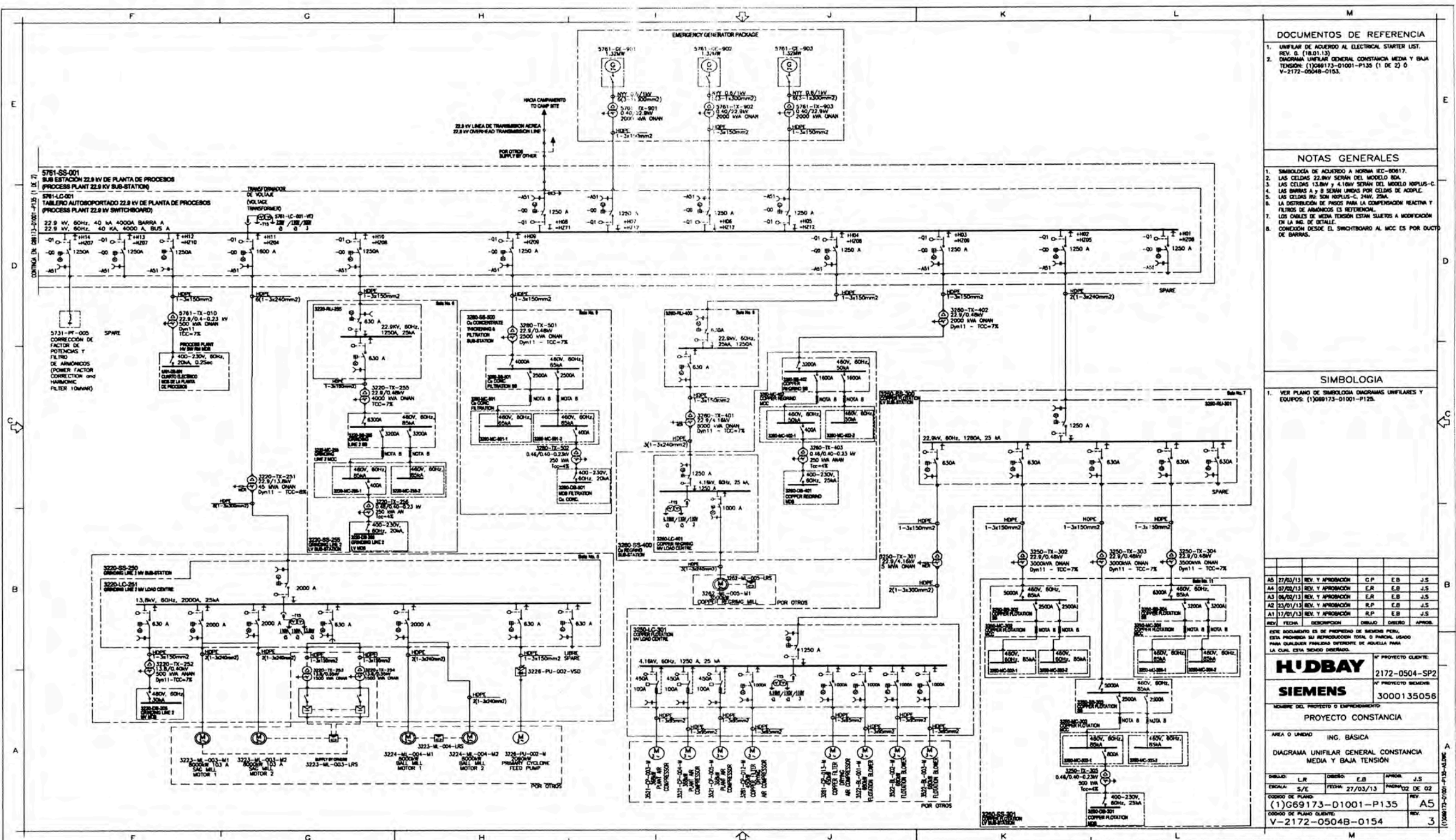
NOMBRE DEL PROYECTO O EMPRENDIMIENTO: **PROYECTO CONSTANCIA**

AREA O UNIDAD: **ING. BASICA**

DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL CONSTANCIA MEDIA Y BAJA TENSION

DISIÑO	L.R.	DISIÑO	E.B.	APROB.	J.S.
ESCALA	S/E	FECHA	27/03/13	PHASE	01 DE 02
CODIGO DE PLANO	(1)G69173-D1001-P135				REV.
CODIGO DE PLANO CLIENTE	V-2172-0504B-0153				REV.
					3

Fig. 5.1 Diagrama Unifilar General Constancia - Media y Baja Tension I.



- DOCUMENTOS DE REFERENCIA**
- UNIFILAR DE ACUERDO AL ELECTRICAL STARTER LIST. REV. 0. (18.01.13)
 - DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL CONSTANCIA MEDIA Y BAJA TENSION: (1)G69173-01001-P135 (1 DE 2) O V-2172-0504B-0153.

- NOTAS GENERALES**
- SIMBOLOGIA DE ACUERDO A NORMA IEC-60617.
 - LAS CELDAS 22.9KV SERAN DEL MODELO BDA.
 - LAS CELDAS 13.8KV Y 4.16KV SERAN DEL MODELO HOPUS-C.
 - LAS BARRAS A Y B SERAN UNIDAS POR CELDAS DE ADOPL.
 - LAS CELDAS SON HOPUS-C. 25KV, 25KA.
 - LA DISTRIBUCION DE PISOS PARA LA COMPENSACION REACTIVA Y FILTROS DE ARMONICOS ES REFERENCIAL.
 - LOS CABLES DE MEDIA TENSION ESTAN SUJETOS A MODIFICACION EN LA ING. DE DETALLE.
 - CONEXION DESDE EL SWITCHBOARD AL MCC ES POR DUCTO DE BARRAS.

SIMBOLOGIA

- VER PLANO DE SIMBOLOGIA DIAGRAMAS UNIFILARES Y EQUIPOS: (1)G69173-01001-P125.

REV.	FECHA	DESCRIPCION	DESIGNO	APROB.
A5	17/03/13	REV. Y APROBACION	C.P	E.B
A4	07/02/13	REV. Y APROBACION	E.R	E.B
A3	06/02/13	REV. Y APROBACION	E.R	E.B
A2	23/01/13	REV. Y APROBACION	R.P	E.B
A1	17/01/13	REV. Y APROBACION	R.P	E.B

ESTE SIMBOLOGIO ES DE PROPIEDAD DE SIEMENS PERU. ESTA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL, USADO PARA CUALQUIER FINALIDAD DIFERENTE DE AQUELLA PARA LA CUAL ESTA SIENDO DISEÑADO.

HUBBAY Nº PROYECTO CLIENTE: 2172-0504-SP2
SIEMENS Nº PROYECTO SIEMENS: 30001.35056

MEMBRE DEL PROYECTO O EMPRENDIMIENTO: PROYECTO CONSTANCIA

AREA O UNIDAD: ING. BASICA
 DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL CONSTANCIA MEDIA Y BAJA TENSION

DESIGNO:	LR	DESIGNO:	E.B	APROB.	J.S
ERONAL:	S/E	FECHA:	27/03/13	FORMA:	02 DE 02
CODIGO DE PLANO:	(1)G69173-01001-P135	REV:			A5
CODIGO DE PLANO CLIENTE:	V-2172-0504B-0154	REV:			3

Fig. 5.2 Diagrama Unifilar General Constancia - Media y Baja Tensión II.

5.6. Análisis de Arco Eléctrico.

El software ETAP realiza el análisis de Arco Eléctrico tomando en consideración lo siguiente:

- Los niveles de Categoría del Riesgo mencionados en el estándar NFPA 70E.

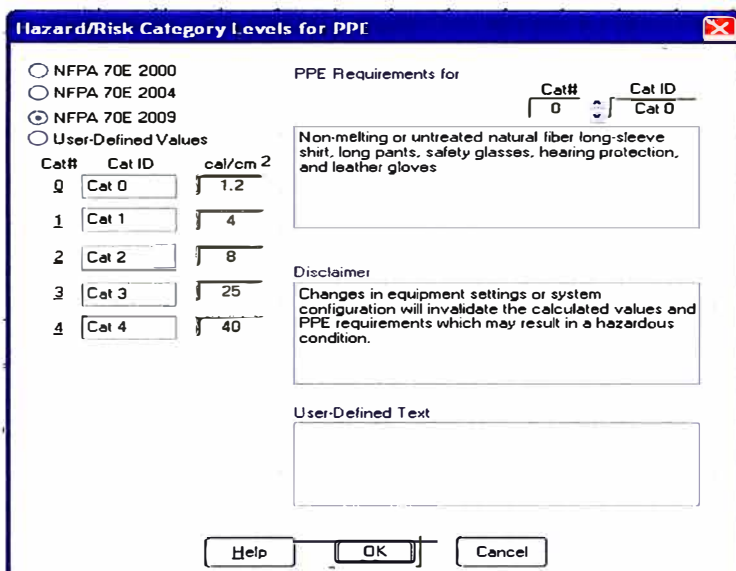


Fig. 5.3 ETAP-Niveles de Riesgo según NFPA 70E.

- Las distancias de Gap (distancias típicas de separación entre barras o conductores), X Factor y distancias típicas de trabajo haciendo referencia al estándar IEEE 1584.

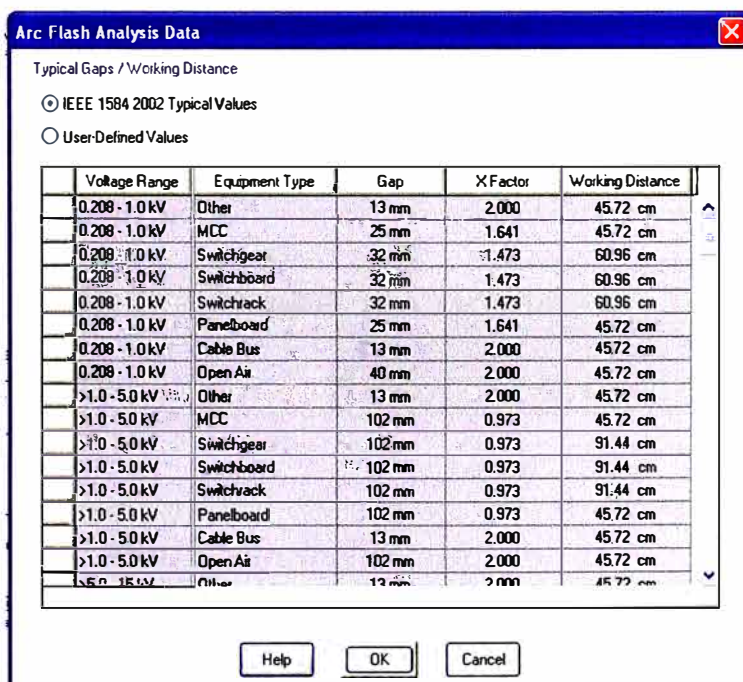


Fig. 5.4 ETAP-Datos de análisis de Arco Eléctrico según IEEE 1584.

- Análisis de riesgo por Shock Eléctrico haciendo referencia al estándar NFPA 70E.

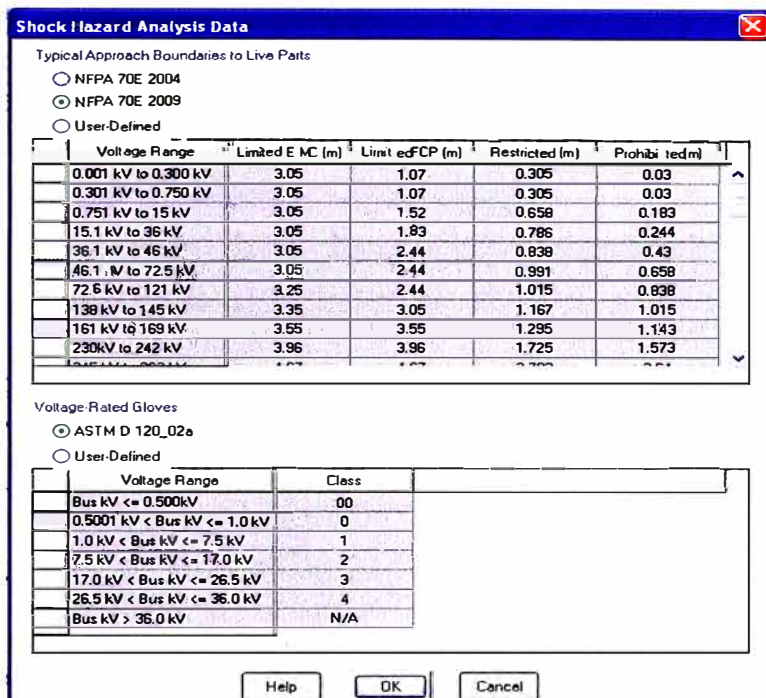


Fig. 5.5 ETAP-Datos de análisis de Shock Eléctrico según NFPA70E.

5.7. Equivalente Thevenin.

La característica del equivalente Thevenin de nuestra simulación es en base a la TABLA N° 5.1 donde se mencionaron las potencias de cortocircuito monofásico y trifásico, la simulación se realizó para los valores de cortocircuito al año 2016 según se muestra en la siguiente figura Fig. 5.6.

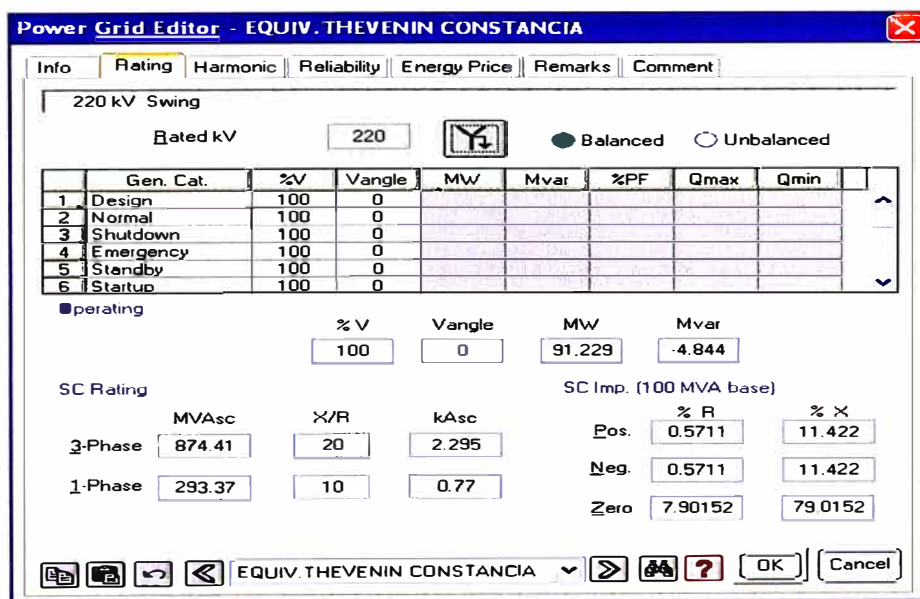


Fig. 5.6 Equivalente Thevenin de Mina Constancia.

5.8. Cargas de Simulación.

Las cargas de simulación comprenden:

- Zona de Chancado:

La zona de Chancado Primario asociado a la Barra B presenta dos sistemas:

- ✓ 3100-LC-101: Centro de Distribución de MT de Chancado Primario.
- ✓ 3100-MC-102: CCM de Chancado Primario.

A continuación se muestra las cargas asociadas a ambos sistemas en las TABLA N° 5.2 y TABLA N° 5.3 obtenidos de la memoria de cálculo de máxima demanda de mina Constancia (12).

TABLA N° 5.2 3100-LC-101: Centro de Distribución de MT de Chancado Primario.

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	kVAR	kW	kVAR
1.0	3100-LC-101	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE CHANCADO PRIMARIO					
1.01	3111-CR-001-M	PRIMARY CRUSHER	1	842.11	477.24	0.00	0.00
1.02	3121-CV-001-M1	STOCKPILE FEED CONVEYOR	1	298.95	191.54	0.00	0.00
1.03	3121-CV-001-M2	STOCKPILE FEED CONVEYOR	1	298.95	191.54	0.00	0.00
				1440.0	860.3	0.0	0.0
		Potencia Total kVA		1677.4		0.0	

TABLA N° 5.3 3100-MC-102: CCM de Chancado Primario.

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	kVAR	kW	kVAR
1.0	3100-MC-102	CCM DE CHANCADO PRIMARIO					
1.01	3111-CN-001-M*	PRIMARY CRUSHER OVERHEAD CRANE	1	0.00	0.00	92.63	69.47
1.02	3111-CP-001-M	CRUSHING AIR COMPRESSOR	1	67.37	43.52	0.00	0.00
1.03	3111-CR-001-LRS	PRIMARY CRUSHER	1	45.09	29.12	0.00	0.00
1.04	3111-FA-001-M	PRIMARY CRUSHER FEEDER GEARBOX COOLING FAN	1	1.24	0.79	0.00	0.00
1.05	3111-FA-651-M	PRIMARY CRUSHER LUBE HEAT EXCHANGER FAN	1	6.22	3.96	0.00	0.00
1.06	3111-FA-652-M*	PRIMARY CRUSHER LUBE HEAT EXCHANGER FAN	1	0.00	0.00	6.22	3.96
1.07	3111-FE-001-M	PRIMARY CRUSHER DISCHARGE FEEDER	1	248.96	158.21	0.00	0.00
1.08	3111-HE-651-M	PRIMARY CRUSHER LUBE RESERVOIR HEATER	1	4.15	2.64	0.00	0.00
1.09	3111-HE-652-M	PRIMARY CRUSHER LUBE RESERVOIR HEATER	1	4.15	2.64	0.00	0.00
1.10	3111-HE-653-M	PRIMARY CRUSHER LUBE RESERVOIR HEATER	1	4.15	2.64	0.00	0.00
1.11	3111-HT-003-M*	CRUSHER DRIVE MAINTENANCE HOIST	1	0.00	0.00	6.32	4.74
1.12	3111-HT-054-M*	CRUSHER LUBE DRUM MAINTENANCE HOIST	1	0.00	0.00	0.93	0.69
1.13	3111-PU-010-M	CRUSHER RAW WATER BOOSTER PUMP	1	21.36	21.19	0.00	0.00
1.14	3111-PU-651-M	PRIMARY CRUSHER LUBE PUMP	1	27.27	27.05	0.00	0.00
1.15	3111-PU-652-M*	PRIMARY CRUSHER LUBE PUMP	1	0.00	0.00	27.27	27.05
1.16	3111-PU-653-M	PRIMARY CRUSHER HYDRAULIC PUMP	1	5.00	4.96	0.00	0.00
1.17	3111-PU-654-M*	PRIMARY CRUSHER HYDRAULIC PUMP	1	0.00	0.00	5.00	4.96
1.18	3121-BR-001-M	STOCKPILE FEED CONVEYOR BRAKE	1	0.24	0.31	0.00	0.00
1.19	3121-BR-002-M	STOCKPILE FEED CONVEYOR BRAKE	1	0.24	0.31	0.00	0.00
1.20	3121-FA-029-M	STOCKPILE FEED CONVEYOR GEARBOX COOLING FAN	1	1.06	1.38	0.00	0.00
1.21	3121-FA-030-M	STOCKPILE FEED CONVEYOR GEARBOX COOLING FAN	1	1.06	1.38	0.00	0.00

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	kVAR	kW	kVAR
1.0	3100-MC-102	CCM DE CHANCADO PRIMARIO					
1.22	3121-HT-012-M	TRAMP METAL HOIST	1	0.93	0.69	0.00	0.00
1.23	4122-PU-340-M*	CRUSHING AREA SEDIMENT POND PUMP	1	18.95	12.24	0.00	0.00
1.24	3111-LU-002-M*	ROCK BREAKER LUBE UNIT SUPPLY	1	0.00	0.00	134.19	100.64
1.25	4122-PU-341-M*	CRUSHING AREA SEDIMENT POND PUMP	1	18.95	12.24	0.00	0.00
1.26	3100-TX-103	CRUSHING MDB TRANSFORMER	1	160.00	99.16	0.00	0.00
1.27	3100-PAA-001	HVAC. AUXLIARY SERVICE	1	160.80	99.65	0.00	0.00
				797.2	524.1	272.6	211.5
		Potencia Total kVA		954.0		345.0	

Se observa que el sistema 3100-LC-101 es un *Switchgear* en Media Tensión de 4.16kV nominal con sus cargas asociadas según el cuadro mostrado en la TABLA N° 5.2.

El sistema mostrado en 3100-MC-102 es un Centro de Control de Motores en Baja Tensión 460V con sus cargas asociadas según el cuadro mostrado en la TABLA N° 5.3.

- Zona de Molienda

La zona de Molienda asociado a la Barra A presenta el sistema:

- ✓ 3100-LC-201: Centro de Distribución de MT de Chancado Primario

A continuación se muestra las cargas asociadas a la zona de molienda en la TABLA N° 5.4.

TABLA N° 5.4 3100-LC-201: Centro de Distribución de MT de Línea 1 Molienda

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	kVAR	kW	kVAR
2.0	3220-LC-201	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE LÍNEA 1 MOLIENDA					
2.01	3221-ML-001-M1	SAG MILL	1	8247.42	5219.46	0.00	0.00
2.02	3221-ML-001-M2	SAG MILL	1	8247.42	5219.46	0.00	0.00
2.03	3222-ML-002-M1	BALL MILL	1	8247.42	5219.46	0.00	0.00
2.04	3222-ML-002-M2	BALL MILL	1	8247.42	5219.46	0.00	0.00
2.05	3225-PU-001-M	PRIMARY CYCLONE FEED PUMP	1	1763.71	2174.11	0.00	0.00
2.06	3220-TX-202	GRINDING LINE 1 MV MDB TRANSFORMER	1	340.00	210.71	0.00	0.00
				35093.4	23262.7	0.0	0.0
		Potencia Total kVA		42103.4		0.0	

El sistema 3100-LC-101 es un *Switchgear* en Media Tensión de 13.8kV con sus cargas asociadas según la TABLA N° 5.4.

5.9. Otras Zonas.

Las cargas de las otras zonas involucradas en el proyecto minero Constanca son:

- 3210-MC-151 CCM de Pila de Acopio y Recuperación
- 3290-LC-601: Centro de Distribución de MT de Espesador de Relaves
- 3290-MC-602: CCM Espesado de Relaves.
- 3300-MC-701: CCM de Planta de Molibdeno.
- 3220-LC-201: CCM de Línea 1 de Molienda.
- 3220-LC-251: Centro de Distribución de MT de Línea 2 de Molienda.
- 3220-MC-255: CCM de Línea 2 de Molienda.
- 3280-MC-501: Concentrado y Filtrado de Cu.
- 3260-LC-401: Centro de Distribución de MT de Copper Regring
- 3260-MC-402: CCM de Copper Regring.
- 3250-LC-301: Centro de Distribución de MT de Flotación de Cobre.
- 3250-MC-302: CCM de Flotación de Cobre 1.
- 3250-MC-303: CCM de Flotación de Cobre 2.
- 3250-MC-304: CCM de Flotación de Cobre 3.
- Facilidades de Camp Site.

A continuación se muestra las cargas asociadas según la TABLA N° 5.5.

TABLA N° 5.5 Lista de las Otras Cargas.

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	KVAR	kW	KVAR
1.0	3100-SS-100	SUBESTACIÓN DE CHANCADO					
1.01	3100-LC-101	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE CHANCADO PRIMARIO	1	1440.00	860.32	0.00	0.00
1.02	3100-MC-102	CCM DE CHANCADO PRIMARIO	1	797.20	524.07	272.56	211.51
2.0	3210-SS-150	S.E. DE PILA DE ACOPIO Y RECUPERACIÓN					
2.01	3210-MC-151	CCM DE LA PILA DE ACOPIO Y RECUPERACIÓN	1	651.87	412.84	41.87	15.30
3.0	3290-SS-600	S.E. DE ESPESADO DE RELAVES					
3.01	3290-LC-601	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE ESPESADOR DE RELAVES	1	8071.58	5171.54	753.68	482.89
3.02	3290-MC-602	CCM ESPESADO DE RELAVES	1	878.37	554.24	343.11	218.14
4.0	3300-SS-700	S.E. DE PLANTA DE MOLIBDENO					
4.01	3300-MC-701	CCM DE PLANTA DE MOLIBDENO	1	1947.41	1324.89	76.27	56.97
5.0	3220-SS-205	S.E. DE BAJA TENSIÓN LÍNEA 1 DE MOLIENDA					
5.01	3220-MC-205	CCM DE LÍNEA 1 DE MOLIENDA	1	2086.40	1367.92	1024.82	650.84
6.0	3220-SS-200	S.E. DE MEDIA TENSIÓN LÍNEA 1 DE MOLIENDA					
6.01	3220-LC-201	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE LÍNEA 1 MOLIENDA	1	35093.40	23262.67	0.00	0.00
7.0	3220-SS-250	S.E. DE MEDIA TENSIÓN LÍNEA 2 DE MOLIENDA					
7.01	3220-LC-251	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE LÍNEA 2 MOLIENDA	1	35093.40	23262.67	0.00	0.00
8.0	3220-SS-255	S.E. DE BAJA TENSIÓN LÍNEA 2 DE MOLIENDA					
8.01	3220-MC-255	CCM LÍNEA 2 DE MOLIENDA	1	2006.74	1310.66	836.11	527.66
9.0	3280-SS-500	S.E. Cu CONCENTRATE THICKENING & FILTRATION					
9.01	3280-MC-501	CCM CONCENTRADO Y FILTRADO DE Cu	1	1777.48	1152.14	224.32	140.66

Item	TAG.	DESCRIPCIÓN	Cant.	POTENCIA DE OPERACIÓN (kVA)			
				CONTINUO		STAND BY	
				kW	kVAR	kW	kVAR
10.0	3260-SS-400	S.E. DE TRITURADO DE Cu					
10.01	3260-LC-401	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE COPPER REGRING	1	3157.89	2023.29	0.00	0.00
10.02	3260-MC-402	CCM COPPER REGRIND	1	1096.66	701.61	83.94	58.61
11.0	3250-SS-300	S.E. DE FLOTACIÓN DE Cu					
11.01	3250-LC-301	CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE MT DE FLOTACIÓN DE Cu	1	2522.95	1616.48	882.53	565.44
11.02	3250-MC-302	CCM FLOTACIÓN DE COBRE N°1	1	1899.58	1223.55	117.36	76.21
11.03	3250-MC-303	CCM FLOTACIÓN DE COBRE N°2	1	2379.88	1524.35	735.59	461.80
11.04	3250-MC-304	CCM FLOTACIÓN DE COBRE N°3	1	2190.03	1385.73	3.13	2.34
12.0	-	FACILIDADES					
12.01	-	CAMP SITE (2)	1	1978.80	1226.35	0.00	0.00
12.02	-	POZA DE RELAVES Y BOMBAS DE POZA	1	4420.00	2739.27	0.00	0.00
12.03	-	TAJO	1	3740.00	2317.84	0.00	0.00
13.0	-	SUBTOTAL BARRA B					
13.01	5761-LC-001	PROCESS PLANT 22.9 KV SWITCHBOARD	1	59126.22	38535.60	2512.31	1635.66
				70575.5		2997.8	
14.0	-	SUBTOTAL BARRA A					
14.01	5761-LC-001	PROCESS PLANT 22.9 KV SWITCHBOARD	1	54103.41	35426.82	2882.97	1832.71
				64670.2		3416.2	
				113229.6	73962.4	5395.3	3468.4
		Potencia Total kVA		135245.7		6413.9	

Para el presente análisis de Arco Eléctrico las cargas mostradas en la TABLA N° 5.5 de las otras zonas, distintas a la Chancadora (Media y Baja Tensión) y Molienda (Media Tensión), se han considerado como un motor asíncrono de carga equivalente similar a la TABLA N° 5.5 conectados de manera directa a las Barra A - 576-1-LC-001A de 22.9kV, esto con finalidad de simular y poner todo el interés en el análisis de riesgo por Arco Eléctrico en los *Switchgears* 3100-LC-001 (4.16kV), 3220-LC-201 (13.8kV) y el Centro de Control de Motores 3100-MC-102 (460V).

5.10. Simulación.

El diagrama unifilar mostrado en las figuras Fig. 5.1 y Fig. 5.2 han sido llevados al *software* ETAP, teniendo en consideración las cargas mostradas referentes a las Zonas de Chancado, Molienda y Otras Zonas conforme a las tablas TABLA N° 5.2, TABLA N° 5.3, TABLA N° 5.4 Y TABLA N° 5.5.

A continuación se puede apreciar las figuras Fig. 5.7, Fig. 5.8, Fig. 5.9 y Fig. 5.10 donde se muestran los diagramas unificables simulados y los resultados del cálculo de Análisis de Arco Eléctrico obtenido con el *Software* ETAP.

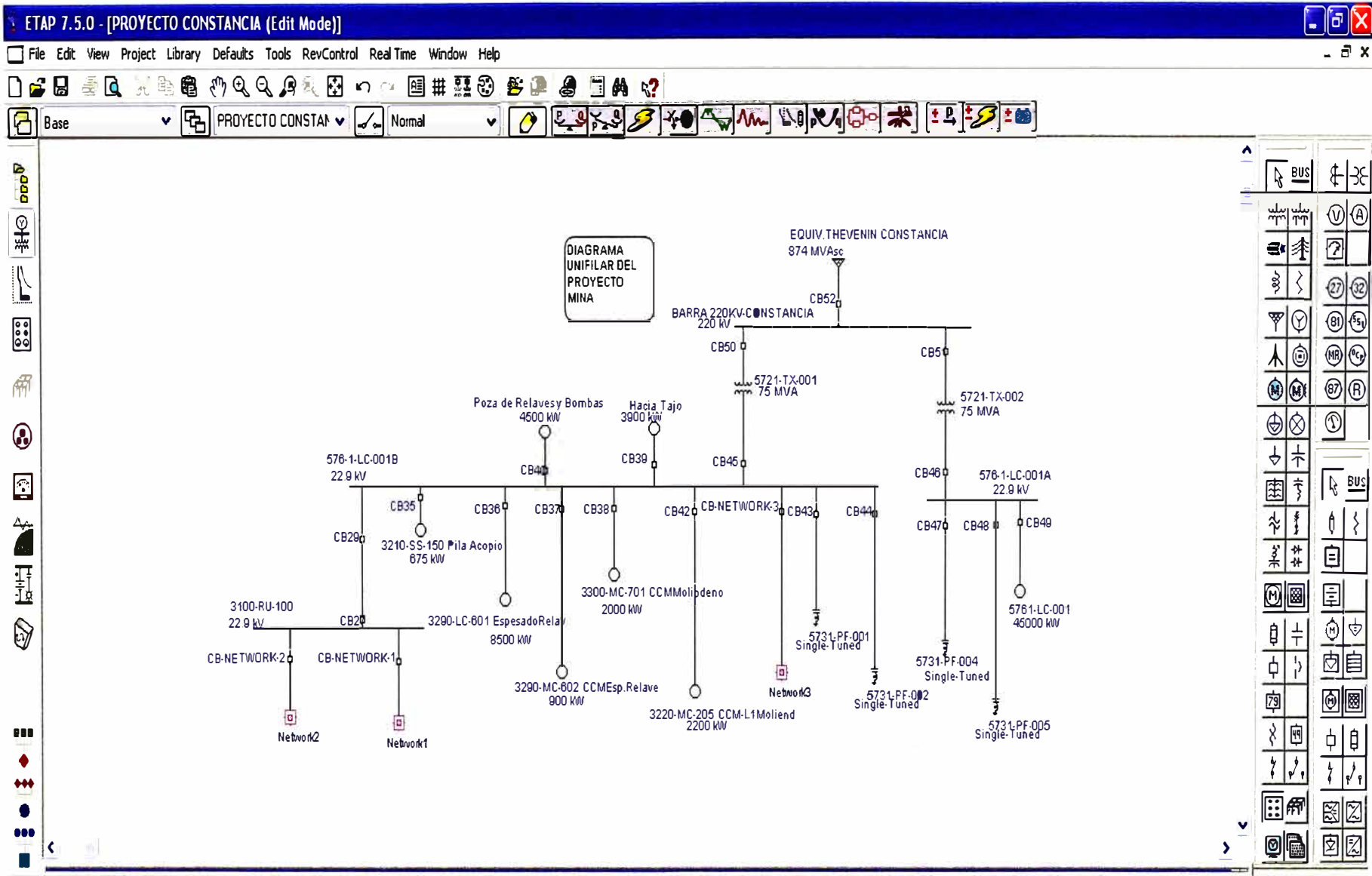


Fig. 5.7 ETAP-Simulación de Diagrama Unifilar Principal.

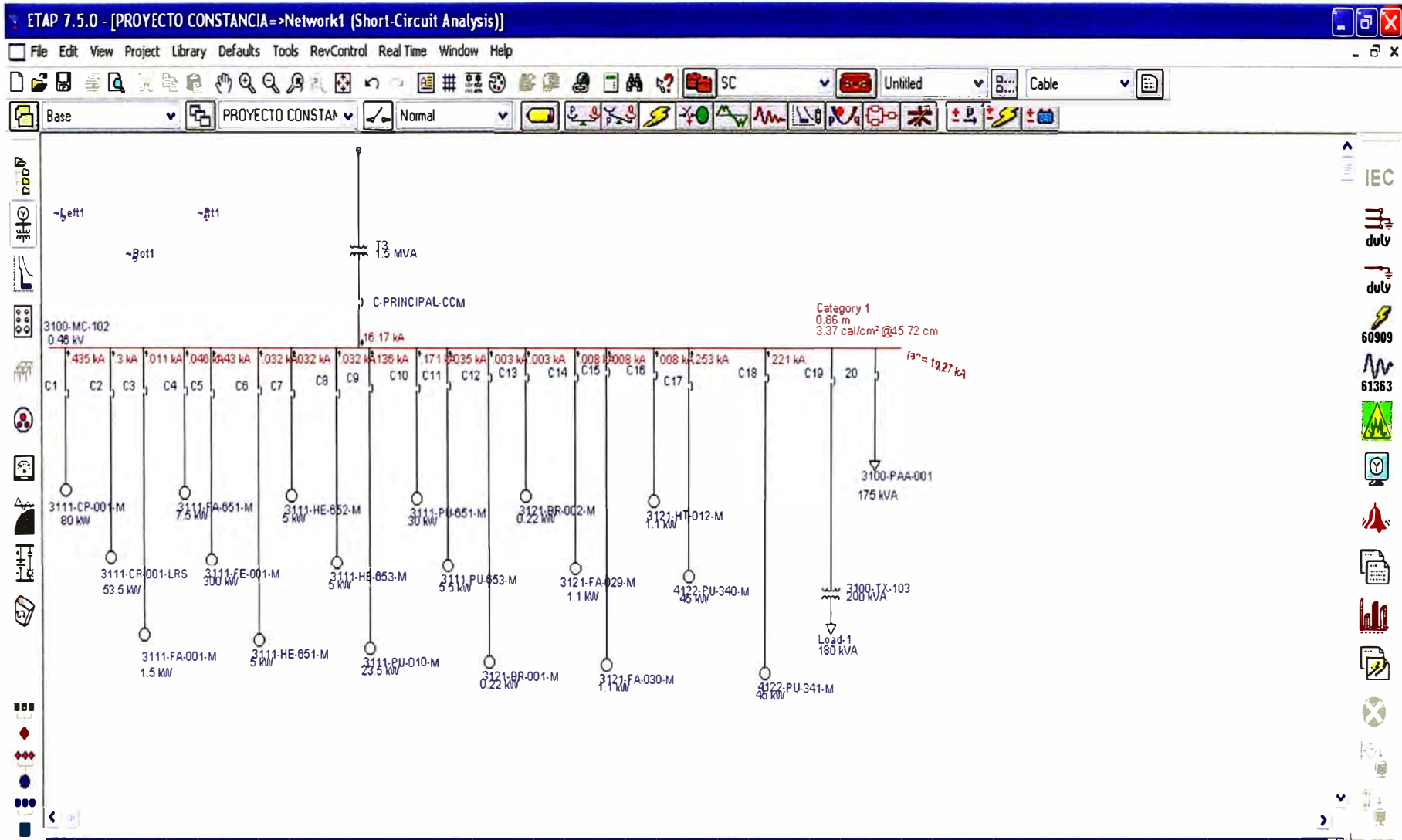


Fig. 5.8 ETAP-Network 1 Simulación Análisis de Arco Eléctrico de 3100-MC-102 CCM de Chancado.

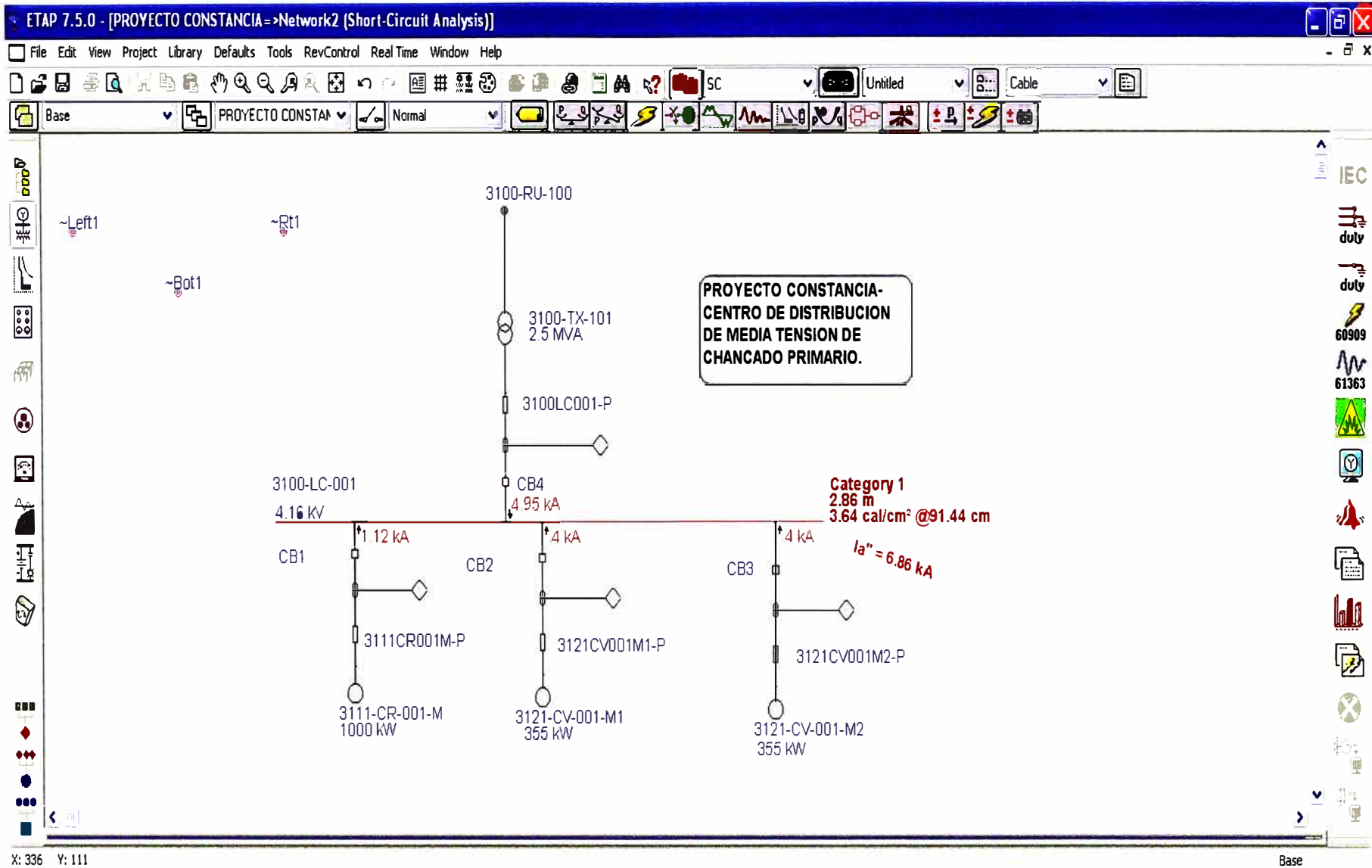


Fig. 5.9 ETAP-Network 2- Análisis de Arco Eléctrico de 3100-LC-01 Centro de Distribución MT de Chancado Primario.

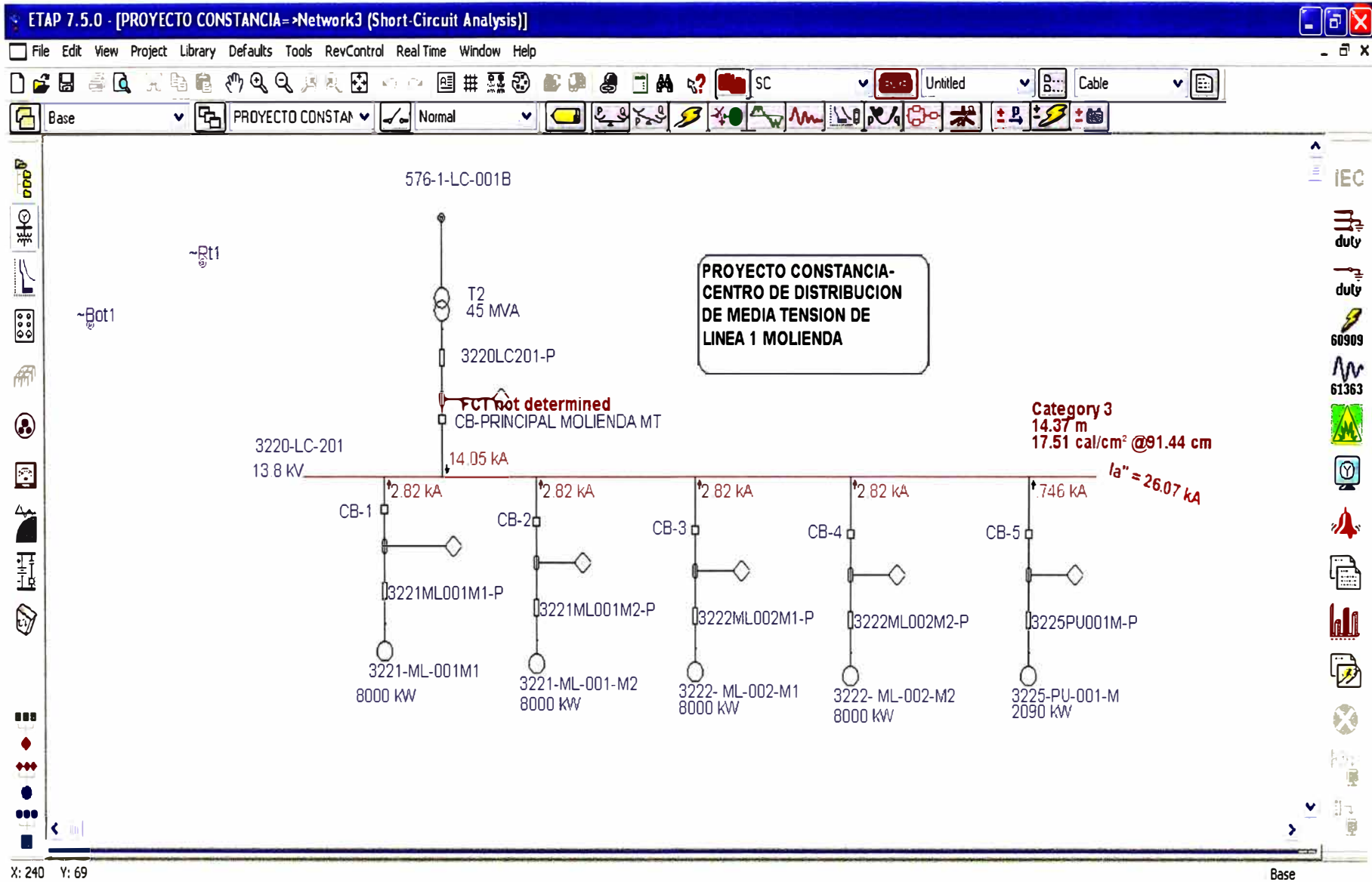


Fig. 5.10 ETAP-Network 3- Análisis de Arco Eléctrico de 3220-LC-201 Centro de Distribución MT de Línea 1 Molienda.

5.11. Coordinación de Protección.

En el análisis mostrado se han utilizado relés de sobre corriente en las siguientes zonas de falla, sus características de curva Tiempo VS Corriente se muestra en las figuras Fig. 5.11, Fig. 5.12 y Fig. 5.13:

a) 3100-MC-102.

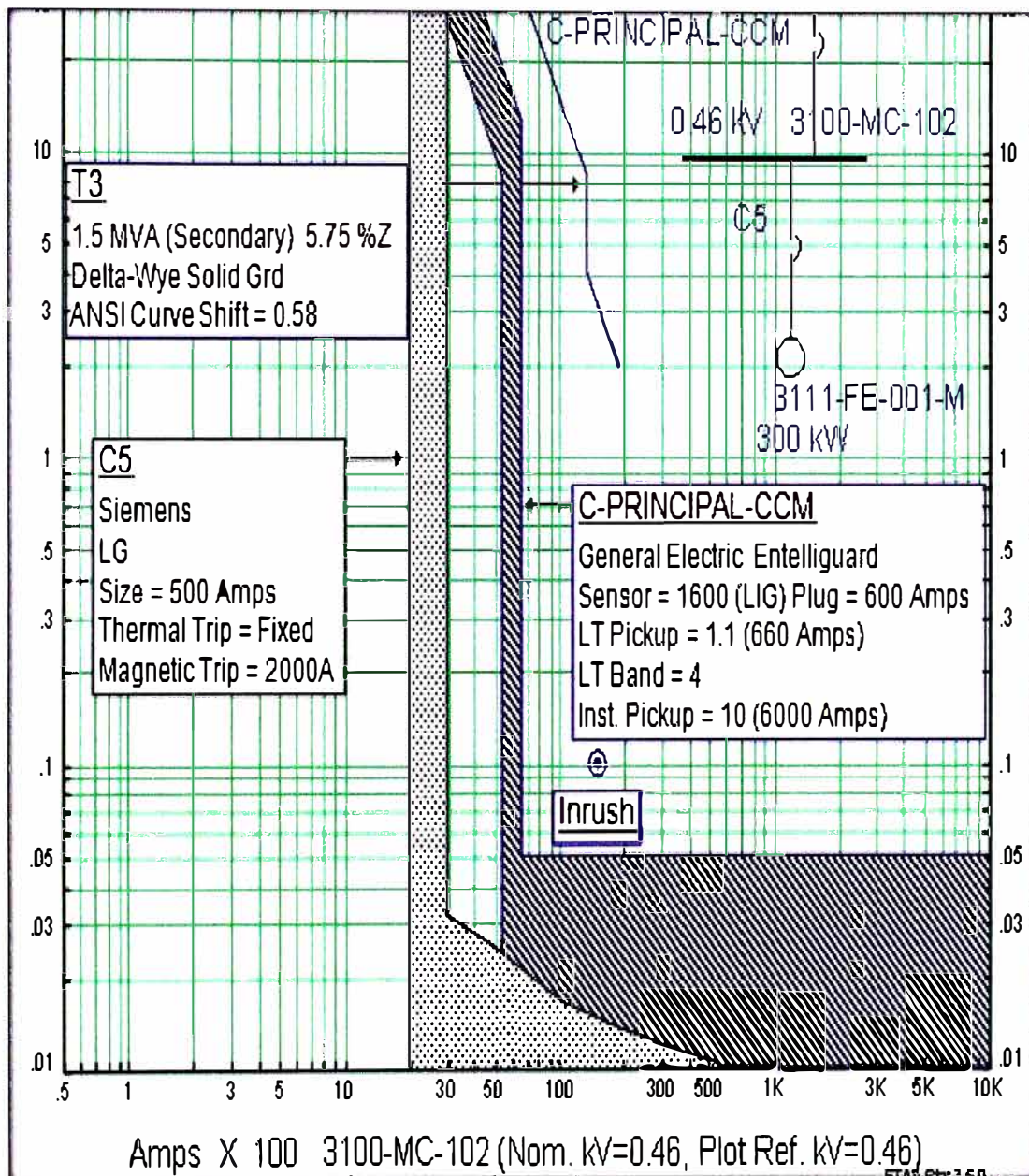


Fig. 5.11 Curva Tiempo VS Corriente de los Interruptores de Potencia de Baja Tensión C5 y C-Principal-CCM

b) 3100-LC-001.

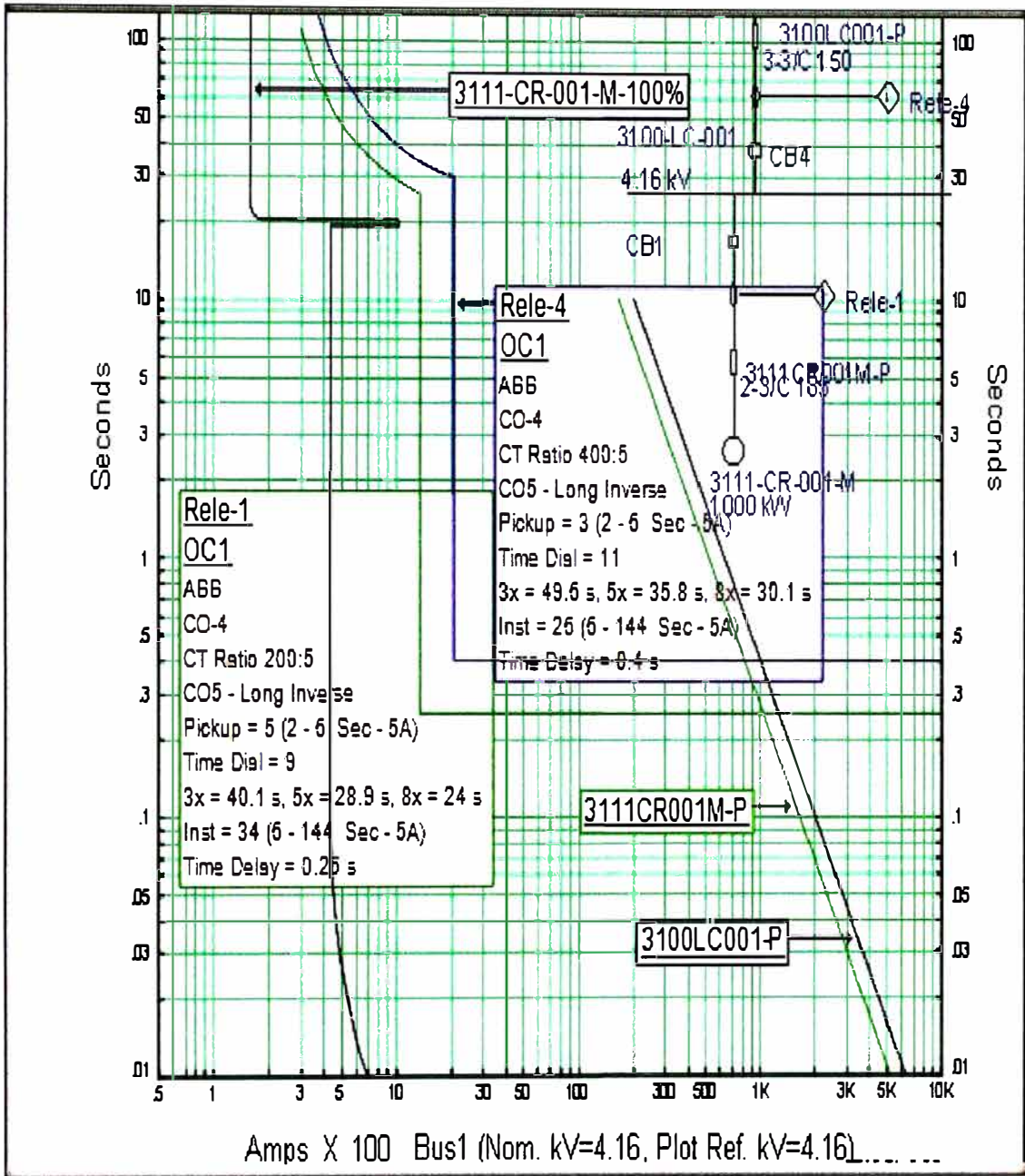


Fig. 5.12 Curva Tiempo VS Corriente del Relé 1 y Relé 4

c) 3220-LC-201.

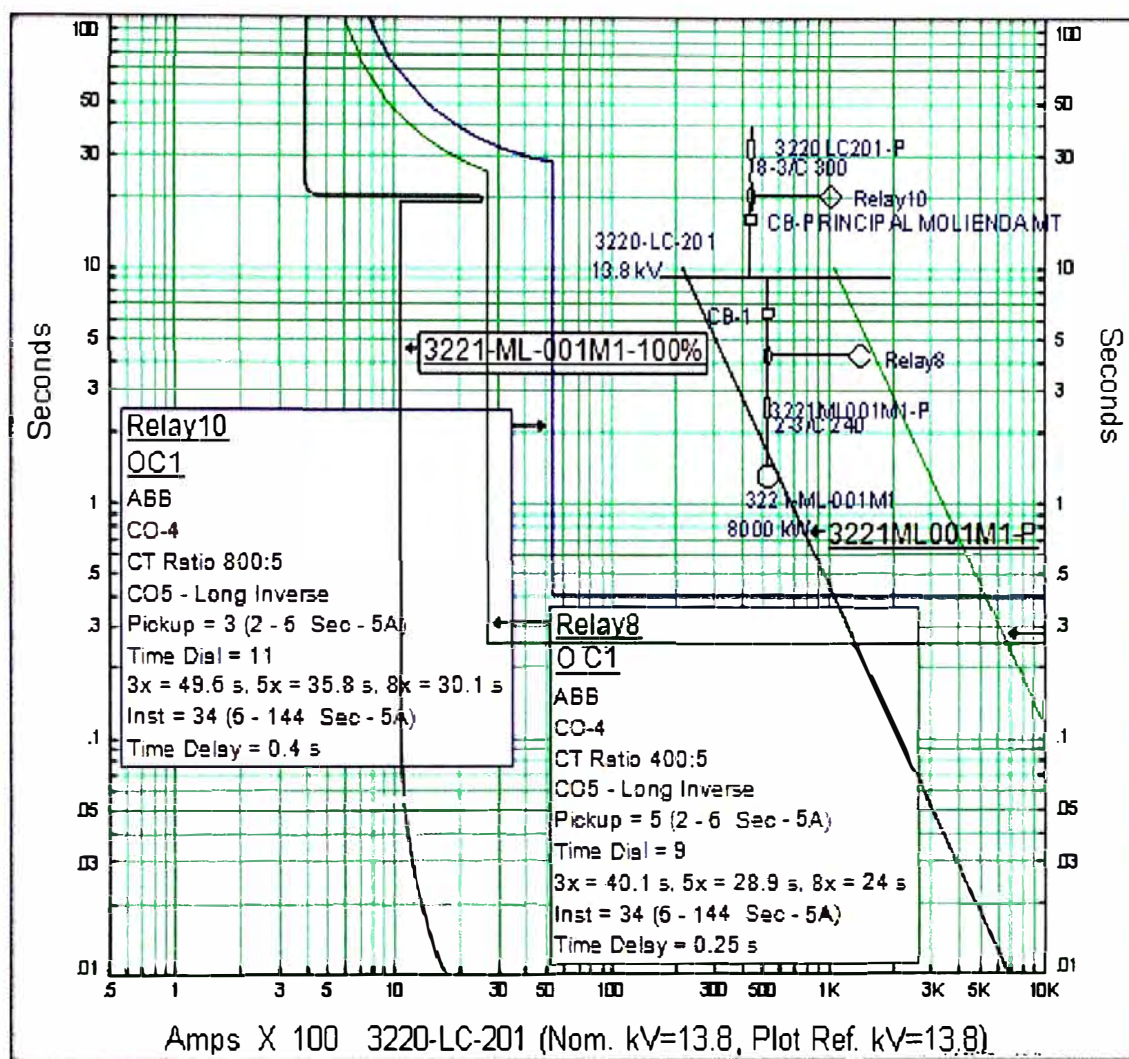


Fig. 5.13 Curva Tiempo VS Corriente del Relé 8 y Relé 10.

5.12. Resultados y Reportes de ETAP.

a) Resultados.

Los resultados obtenidos de la simulación según las potencias de cortocircuito monofásico y trifásico mostrado en la TABLA N° 5.1 se muestran a continuación en la TABLA N° 5.6:

TABLA N° 5.6 Evolución del riesgo por Arco Eléctrico.

Año	Análisis de Riesgo	Equipo		
		3100-LC-001	3100-MC-102	3220-LC-201
2015	Energía Incidente (cal/cm ²)	3.7	3.4	17.4
	Tipo de EPP Requerido	1	1	3
2016	Energía Incidente (cal/cm ²)	3.7	3.4	17.5
	Tipo de EPP Requerido	1	1	3
2018	Energía Incidente (cal/cm ²)	3.9	3.7	17.7
	Tipo de EPP Requerido	1	1	3
2020	Energía Incidente (cal/cm ²)	3.9	3.7	17.7
	Tipo de EPP Requerido	1	1	3

Los resultados detallados obtenidos al año 2016 se muestran en la figura Fig. 5.14. donde se aprecia las consideraciones del equipamiento donde se ha simulado la falla, las corrientes de falla franca y de arco, los dispositivos de protección y los resultados del análisis del Arco Eléctrico indicando el nivel de protección requerido en la utilización del EPP, las distancias de trabajo típicas, la energía incidente tal y cual se muestra a continuación:

Project:	Informe de Suficiencia	ETAP	Page:	1
Location:	Chumbivilcas-Cusco	7.50	Date:	22-01-2014
Contract:	FIEE-UNI		SN:	12345678
Engineer:	PAUL ALEJANDRO CONDORI	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	Proyecto-Constancia		Config:	Normal

Summary - Arc Flash Hazard Calculations														
Faulted Bus			Fault Current				Trip Device			Flash	Incident	Working	Hazard Risk	
ID	Nom kV	Equip Type	Gap (mm)	Boiled Fault (kA) Bus	PD Arc Fault (kA) PD	PD Arc Fault (kA)	Source Trip Device ID	Trip (cycle)	Open (cycle)	FCT (cycle)	Boundary (m)	Energy (cal/cm ²)	Distance (cm)	Hazard Risk Level
3100-LC-001	4.160	Switchgear	102	7.113	5.153	5.030	CB4	24.00	5.00	29.00	2.9	3.7	91	1
3100-MC-102	0.460	MCC	25	37.617	31.612	16.337	C-PRINCIPAL-CCM	3.00	0.00	3.00	0.9	3.4	46	1
3220-LC-201	13.800	Switchgear	153	27.322	14.730	14.054	CB-PRINCIPAL MOLIENDA MT	24.00	5.00	29.00	14.4	17.5	91	3

Fig. 5.14 Resultados del Software ETAP.

b) Etiquetas.

El *software* ETAP facilita a los usuarios la creación de etiquetas de seguridad, según figura Fig. 5.15, que deben ir adheridas en los equipamientos a trabajar donde se muestre el nivel de riesgo y las consideraciones a tomar referente a tipo o clase de EPP a utilizar en las maniobras con equipamientos eléctricos energizados, todas las etiquetas son en referencia al estándar de la NFPA 70E.

En nuestro análisis se han considerado las fallas en los equipamientos 3100-MC-102, 3100-LC-001 y 3220-LC-201 de los cuales se muestra a continuación las etiquetas obtenidas.

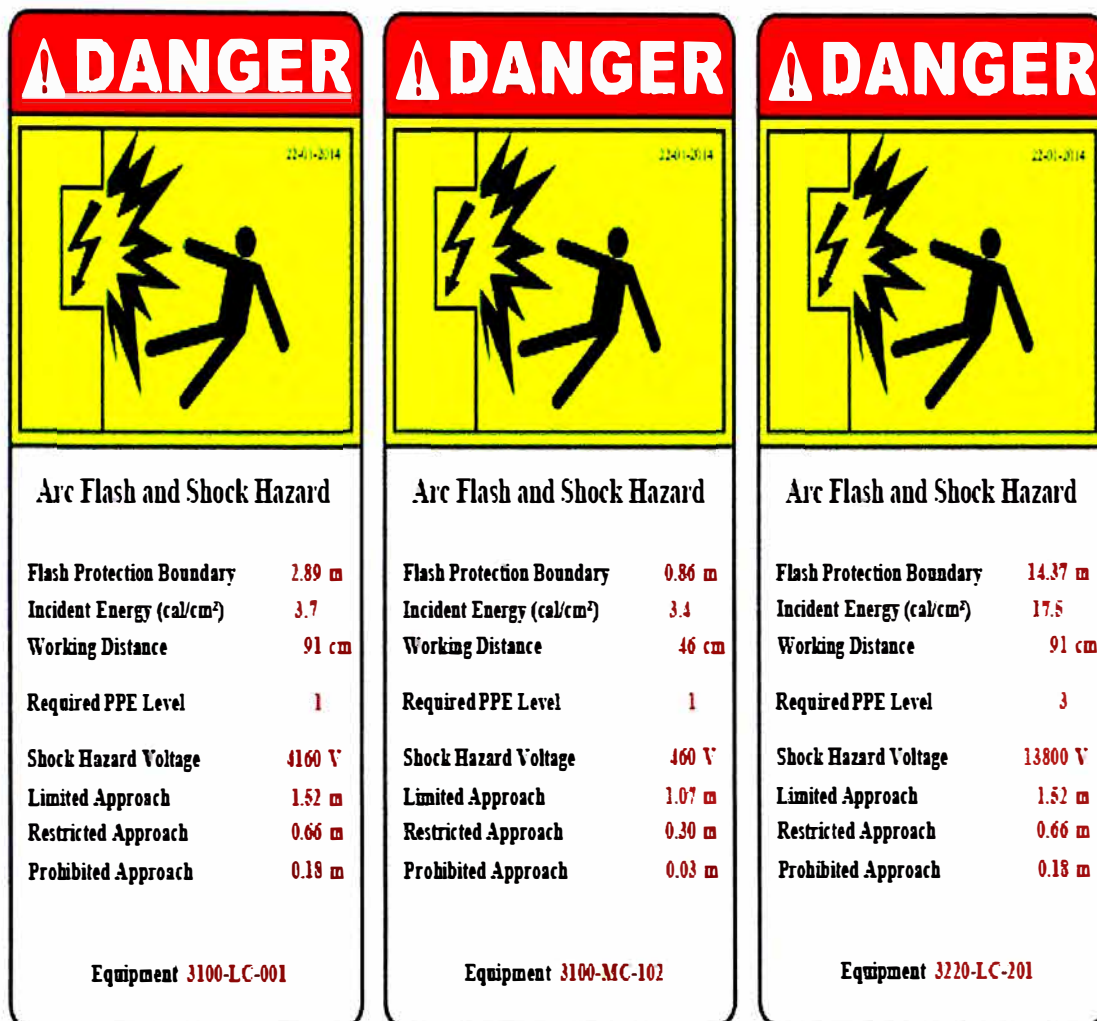


Fig. 5.15 ETAP: Etiquetas de Riesgo por Arco Eléctrico según NFPA 70E.

Analizamos los resultados obtenidos del riesgo de Arco Eléctrico *para* el equipo 3100-LC-001 y los demás son de la misma manera.

- *Flash Protection Boundary* 2.89m: Quiere decir que el límite de protección de un posible punto de ocurrencia de Arco Eléctrico hacia la parte más próxima del cuerpo humano es de 2.89m para recibir una energía incidente de 1.2 cal/cm² (Energía mínima con la que se obtiene quemaduras de según grado curables para el ser humano).
- *Incident Energy (cal/cm²)* 3.7: Quiere decir que se obtiene una energía incidente de 3.7cal/cm² a la parte más próxima del cuerpo humano considerando una distancia de trabajo de 910mm por ser un equipamiento *Switchgear* de rango 4.16kV.
- *Working Distance* 91cm: Quiere decir que se ha considerado una distancia típica de trabajo de 910mm, a mayor aproximación la energía incidente es mayor.

- *Required PPE Level 1*: Quiere decir que para realizar trabajos en este equipamiento se requiere usar Equipo de Protección Personal EPP de Categoría 1 según la NFPA 70E.
- *Shock Hazard Voltage 4160V*: Quiere decir que se corre un riesgo de *Shock* Eléctrico con un nivel de tensión de 4160V.
- *Limited Approach 1.52m*: Quiere decir que el límite de aproximación para personas no Calificadas.
- *Restricted Approach 0.66m*: Quiere decir que la restricción de aproximación es de 0.66m, solo pueden cruzar esta frontera personal calificado que tengan puestos el EPP adecuado, plan de trabajo documentado y aprobado, estar seguro de que ninguna parte del cuerpo entrara en el espacio prohibido y deberá minimizar el riesgo debido a movimientos involuntarios manteniendo el cuerpo lo mas fuera posible del espacio restringido y utilizando en el espacio solo partes del cuerpo tan protegidas como sea necesario para ejecutar el trabajo.
- *Prohibited Approach 0.18m*: Quiere decir que la frontera de aproximación prohibida es de 0.18m, si alguna parte del cuerpo del ser humano llega a acercarse más a la posible fuente causante del Arco Eléctrico se considera como si estuviera en contacto directo. La persona que cruza esta frontera debe recibir entrenamiento específico para trabajar en partes energizadas, tener el plan de trabajo documentado y aprobado que justifique la necesidad del trabajo, realizar el análisis de riesgo del Trabajo y análisis del trabajo seguro (ART y ATS) aprobados y utilizar el EPP adecuado.

5.13. Solución con fibra óptica.

En lo anterior se ha mencionado la coordinación de relés con el objetivo de reducir el tiempo de existencia de la corriente por Arco Eléctrico, cabe mencionar que la norma IEEE 1584 hace referencia a que el mayor valor de energía incidente no debe de ocurrir a la corriente de falla de contacto. Es por ello que los avances tecnológicos han considerado el oportuno diseño de relés ópticos como el que se muestra a continuación (13) en la figura Fig.5.16.



Fig. 5.16 Relé Óptico Multilin A60 Sistema Contra Arco Eléctrico / Marca GE.

Estos relés ópticos requieren de la fibra óptica para que les comuniquen cuando ha sucedido una falla por arco eléctrico, la fibra óptica puede tener longitudes superiores a los 60m. Se emplean fibras plásticas con un núcleo de vidrio y se distribuyen a través de todos los compartimientos de alta tensión, donde pueda haber un alto peligro de ocurrencia de un Arco Eléctrico (14). La distribución típica de la fibra óptica se muestra en la siguiente figura Fig. 5.17.

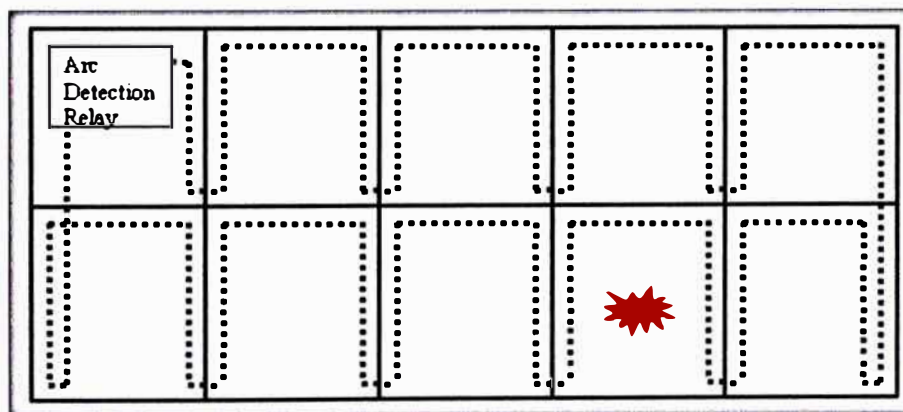


Fig. 5.17 Distribución típica de fibra óptica en tableros eléctricos.

A diferencia de la fibra usada en los sistemas de comunicación, esta no tiene revestimiento que impida la entrada de luz, por el contrario, la operación del sistema depende de la luz externa. La fibra es una vaina plástica con un centro de vidrio, que la

hace adecuada para ambientes hostiles, lo cual la hace adaptable a muchas circunstancias de instalaciones en campo y operación.

La curvatura mínima es de alrededor de 2" (50.8mm) siempre que la fibra sea expuesta a un arco, el rápido incremento de la intensidad de la luz será detectado por el relé óptico contra Arco Eléctrico. No se necesita de cables galvanizados o fotoceldas en los compartimientos de alta tensión. No es necesario darle vueltas a la fibra, pero es recomendado, si lo hace la continuidad e integridad del sensor de la fibra puede ser continuamente monitoreada por el sistema, lo cual se hace enviando un pulso de prueba, el cual si no es recibido a intervalos regulares de tiempo activara la alarma de falla interna del relé. La sensibilidad del relé a la luz puede ser ajustada manualmente o controlada automáticamente. Cuando se ajusta en el modo automático, el relé pone el umbral de sensibilidad, en los cambios bajos en la intensidad de la luz que puede resultar de apertura y cierre de las puertas de los compartimientos. El ajuste manual será más adecuado donde pueden ocurrir niveles bajos de arco como en los antiguos accionamientos por aire o magnéticos. La figura Fig. 5.18 muestra un diagrama de bloqueos del relé de detección de arco (14).

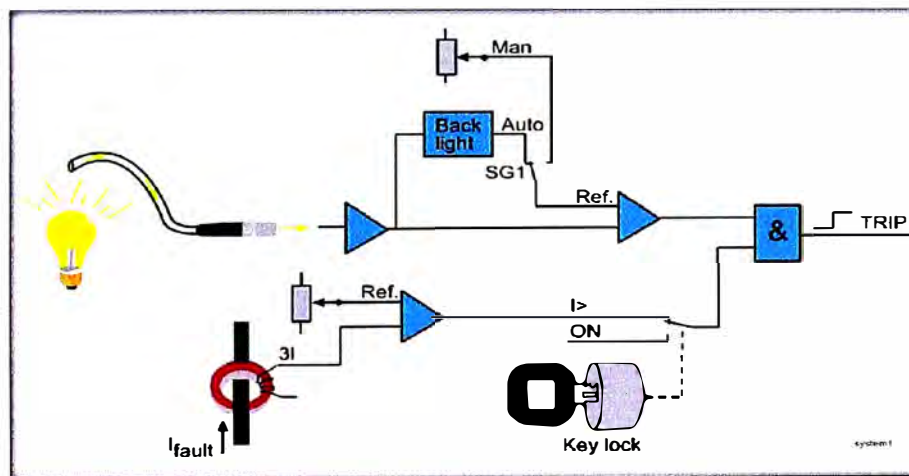


Fig. 5.18 Diagrama de Bloques de un relé con detección de Arco Eléctrico.

Dos salidas rápidas de estado permanente del relé y una de los contactos tipo seco convencionales normalmente abiertos, estarán disponibles para el disparo. El tiempo de operación total de estado permanente y contactos de disparo seco se muestran en la figura Fig. 5.19.

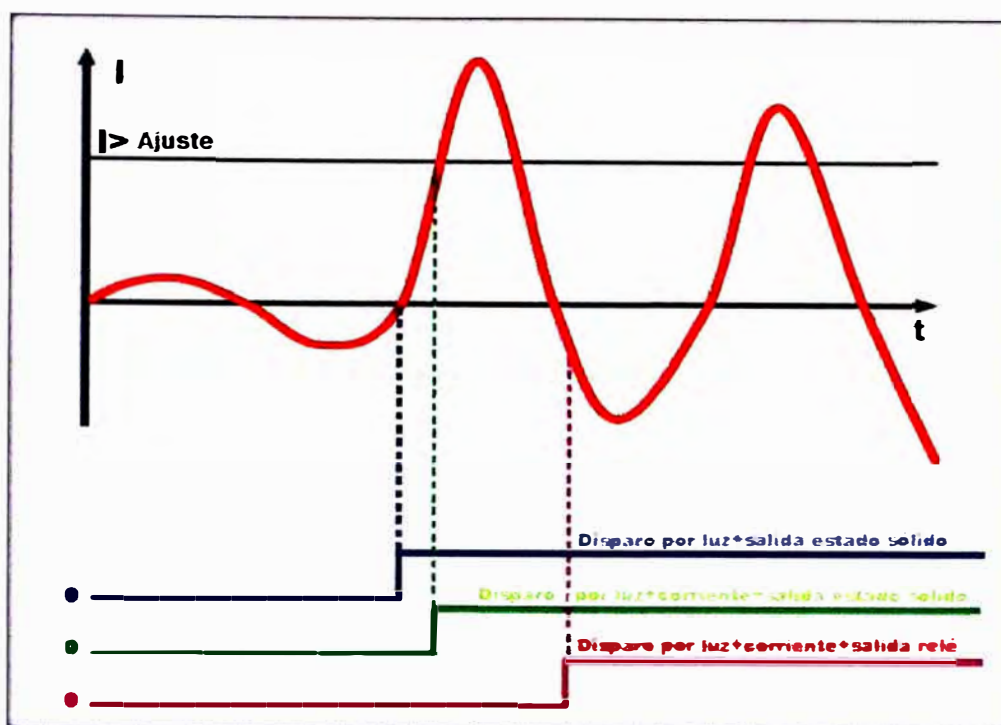


Fig. 5.19 Comparación de los tiempos de operación de disparo.

En la figura Fig. 5.20 se muestra niveles bajos de corriente llevan a tiempos grandes de despeje y por tanto a energías muy altas. El relé de detección de arco se acerca más al disparo instantáneo (14).

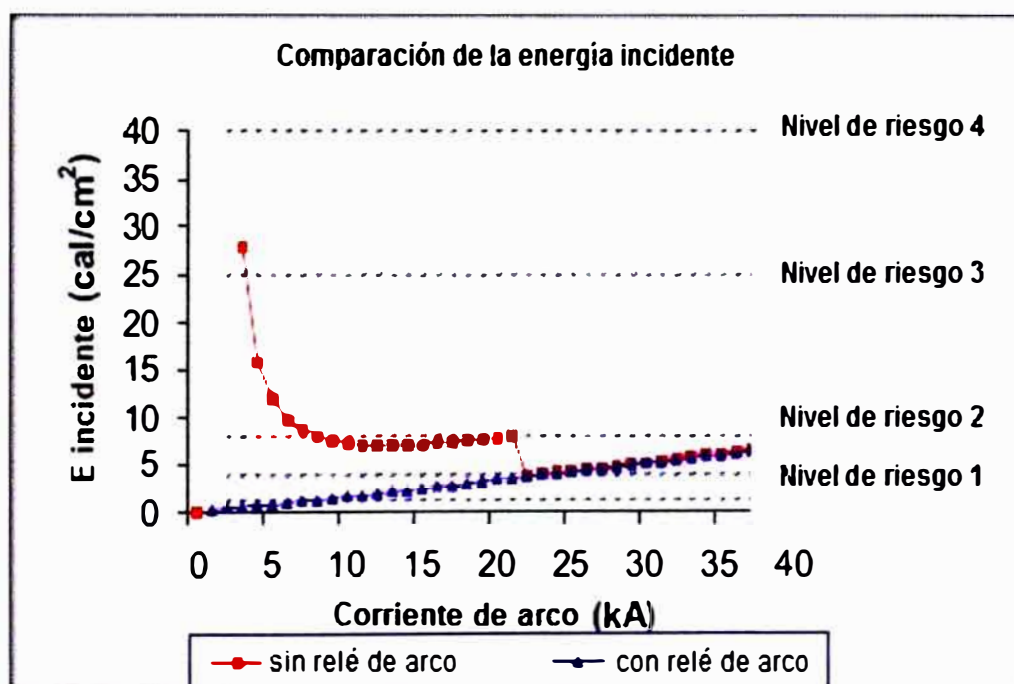


Fig. 5.20 Niveles de energía incidente con protección instantánea y de sobrecorriente de respaldo

Para longitudes mayores a 60m de fibra óptica, se hace necesario de unidades de extensión que conecten el resto de la fibra a la unidad central, por cada 6m por encima de los 60m se hace necesario el empleo de una unidad de extensión y se puede llegar hasta una longitud de 1200m. En la figura Fig. 5.21 se muestra una aplicación simple para cubrir con la fibra óptica 4 alimentadores.

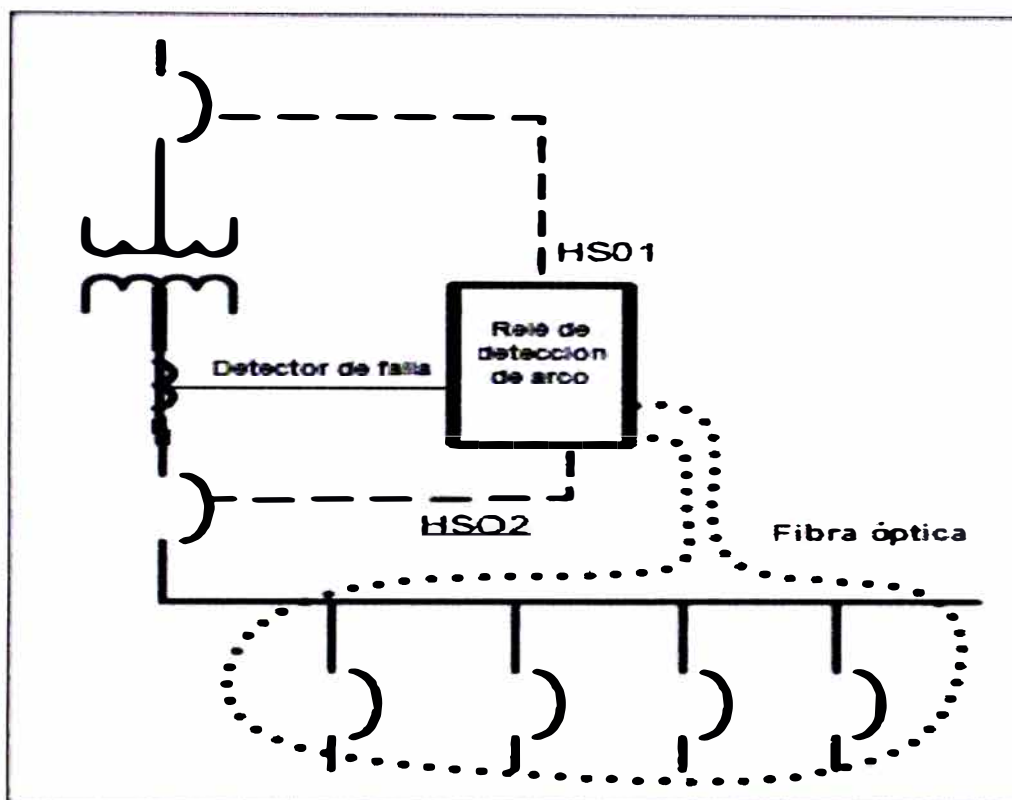


Fig. 5.21 Disposición simple de la fibra óptica para protección contra Arco Eléctrico.

En este ejemplo se utiliza un solo sensor de fibra óptica que abarca cuatro alimentadores distintos. Si se detecta un arco eléctrico y el umbral de detector de fallos se supera en al menos una fase, tanto del lado de alta y de baja secundarios interruptores se disparan a través de los relés de estado sólido de disparo de alta velocidad.

Los relés ópticos mediante la comunicación de una falla por la fibra óptica pueden llegar a enviar órdenes de apertura en 2ms a los interruptores, lo cual adiciona una protección que es muy ventajosa al personal electricista o al equipamiento eléctrico (14).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. La forma de protegernos contra el riesgo por Arco Eléctrico más eficiente es realizar los trabajos de maniobra en equipamientos eléctricos cuando estos se encuentren sin energía.
2. Las corrientes de arco son menores que las corrientes de falla trifásica franca.
3. El estándar IEEE1584 muestra distancias típicas de trabajo y separación de conductores también llamados *Gap*, las cuales son de mucha utilidad al momento de realizar los cálculos de corriente de arco y energía incidente.
4. Ambos Estándares IEEE1584 y NFPA 70E tienen limitaciones en análisis en niveles de tensión nominal y corrientes de cortocircuito.
5. El estándar NFPA 70E establece los límites de aproximación llamadas frontera de límite de aproximación, frontera de aproximación restringida y frontera de aproximación prohibida las cuales se interpreta en distancias de aproximación a la posible fuente de Arco Eléctrico.
6. El estándar NFPA 70E brinda los estándares internacionales que deben cumplir los elementos del EPP (lentes, casco, botas, guantes, ropa) a utilizar según las categorías de riesgos que van desde 0 hasta 4.
7. Una energía incidente de 1.2 cal/cm^2 es la mínima energía que puede originar quemaduras de segundo grado las cuales llegan a ser curables.
8. Las Instalaciones Eléctricas en los Centros Mineros, las cuales tienen instalados motores de gran potencia como molinos que son del orden de MW tienen sistemas de gran aporte de corriente de falla, lo que se traduce en corrientes de arco las cuales llegan a originar mayores energías incidentes.
9. El *software* ETAP es de mucha ayuda y flexibilidad al momento de realizar cálculos de incidencia de energía calorífica a diferentes distancias de trabajo. Se pueden

utilizar las distancias típicas según el estándar IEEE 1584 como también variar los valores según las condiciones que se presentan en las instalaciones eléctricas y obtener la energía incidente.

10. El *software* ETAP brinda un reporte donde muestra el nivel de categoría que debe tener el EPP, según la categoría de riesgo, a utilizar de acuerdo al estándar NFPA 70E versión 2009.
11. La utilización de un *software* llega tomar importancia por la facilidad que brinda al ingeniero encargado de cálculos de riesgos de Arco Eléctrico.

RECOMENDACIONES

1. Nuestro SEIN año a año va creciendo y haciéndose más robusto, las plantas industriales y mineras se van incrementando a mayor ritmo que el personal electricista capacitado por lo que organismos reguladores como Osinergmin deben supervisar y priorizar la seguridad eléctrica.
2. Se recomienda que a un nivel mayor de energía incidente de 40calcm^2 no se debe trabajar con el sistema energizado.
3. Se recomienda utilizar la TABLA N° 3.2 de la NFPA 70E si no se ha realizado un análisis de Arco Eléctrico, en ella se encuentra las diversas actividades que se pueden realizar en un sistema eléctrico en los diferentes equipamientos y niveles de tensión las cuales se asocian a una determinada categoría de riesgo.
4. Analizar la utilización de la tecnología de relés ópticos con comunicación por fibra óptica de las fallas de arco eléctrico, los cuales pueden reducir los tiempos de apertura hasta 2ms.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE 1584 Guide for performing arc-flash hazard calculations", IEEE-USA, 2002
- (2) *Institute of Electrical and Electronic Engineers, "IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition", Año 2000.*
- (3) Ralph Lee, "The other electrical hazard: electric arc blast burns". IEEE Transactions on Industry Applications-USA, 1982.
- (4) National Fire Protection Association. "NFPA 70E Standard for electrical safety Requirements for Employee Workplace", NFPA-USA, 2009.
- (5) Neal, T.E., Bingham, A.H. and Doughty, RL. Doughty. "Protective Clothing Guidelines for electric arc exposure", IEEE transaction on industry applications-USA, 1997.
- (6) ASTM F-1959/F-1959M-99 Standard Test Method for Determining the Thermal Performance Value of Materials for Clothing, ASTM-USA, 1999.
- (7) National Fire Protection Association, "Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance", NFPA-USA, 2006.
- (8) R.L Doughty, T.E Neal and H.L Floyd, "Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600V power distribution systems", IEEE transaction on industry applications-USA, 2000.
- (9) www.etap.com
- (10) Cesel Ingenieros, "Estudio de pre operatividad del proyecto Mina Constancia", Cesel Ingenieros, CESEL INGENIEROS-Perú, Año 2008.
- (11) Siemens, "Diagrama Unifilar General Constancia-Media y Baja Tensión", Siemens-Perú, 2013.
- (12) Ausenco, "Memoria de Cálculo de Máxima Demanda-Proyecto Constancia", Ausenco-Perú, 2013.
- (13) <http://www.gedigitalenergy.com/products/manuals/a60/A60man-a2.pdf>, Año 2012.

- (14) Christopher Inshaw, Robert A. Wilson, "Arc flash hazard analysis and mitigation", Western Protective Relay Conference, USA-Oct 2004.