



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO CON TECNOLOGÍA SEL

TRABAJO RECEPCIONAL

Que para obtener el grado de:
Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia

Presenta:

Juan Fernando Reynoso Arce

Asesores:

Dr. Aarón Esparza Gurrola

Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez

San Luis Potosí, S. L.P.

Abril 2021



18 de febrero de 2021

**DR. AARÓN ESPARZA GURROLA
P R E S E N T E.**

De conformidad con las facultades que el H. Consejo Técnico Consultivo otorgó a esta Secretaría, le comunico que ha sido propuesto como *Asesor del Trabajo de Tesis* que deberá desarrollar el **Ing. Juan Fernando Reynoso Arce**, para obtener el grado de **Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia**. Se le indica que es obligatoria la participación del Asesor y Coasesor en los exámenes Previo y Final de Grado.

El tema propuesto para dicho trabajo es el siguiente:

"PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO CON TECNOLOGÍA SEL"

Solicito a Usted tome nota que dicho Tema ha quedado registrado y que su vigencia es de un año a partir de la fecha; si transcurrido ese lapso su asesorado no concluye el trabajo, deberá hacer nuevo trámite de registro y/o solicitar **prórroga** para la terminación del mismo.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE



DR. RICARDO ROMERO MÉNDEZ

SECRETARIO DEL CONSEJO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECRETARÍA

Copia. Asesorado.
Coordinador Académico del Posgrado.
Consejero Maestro Del Posgrado.
H. Consejo Técnico Consultivo.

*etn.

www.uaslp.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, mi esposa Ana y mi hija Fernanda, por siempre ser el motor de mi esfuerzo y su apoyo incondicional para mi desarrollo personal y profesional.

Agradezco a mis asesores, Dr. Aarón Esparza Gurrola y Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez por su apoyo, paciencia y directriz en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a la empresa Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) por todo el apoyo y las facilidades brindadas a los alumnos de este posgrado y por siempre apoyar el desarrollo de sus empleados.

Agradezco los consejos y motivación del maestro Emanuel Rosas Hernández.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Historia del estudio del arco eléctrico	2
1.2	Antecedentes	2
1.3	Planteamiento del problema y objetivo	3
2	ARCO ELÉCTRICO.....	4
2.1	Energía incidente	4
2.2	¿Qué es un arco eléctrico y cuales son sus causas?	4
2.3	Luminosidad intensa	6
2.4	Temperaturas extremas.....	7
2.5	Ruido extremo.....	7
2.6	Explosión	8
3	LÍMITES DE PROXIMIDAD	9
3.1	Límite de restricción.....	10
3.2	Límite de aproximación.....	10
3.3	Límite de arco eléctrico.....	10
3.4	Límites de arco eléctrico	11
4	EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL (EPP).....	12
4.1	Tipos de EPP	12
4.2	Categorías de EPP	13
4.3	EPP nivel 0.....	14
4.4	EPP nivel 1	14
4.5	EPP nivel 2.....	15
4.6	EPP nivel 3.....	15
4.7	EPP nivel 4.....	16
4.8	Energía incidente superior a nivel 4.....	17
5	ETIQUETADO SOBRE RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO	18
5.1	Encabezado de peligro o advertencia	19
5.2	Indicación de energía incidente a:	20
5.3	EPP requerido	20
5.4	Límite de arco eléctrico.....	21
5.5	Riesgo de choque si se retira la tapa	21
5.6	Indicación de límite de restricción y límite de aproximación	22

6	MÉTODO DE CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO	23
6.1	Recopilación de datos del sistema.....	24
6.2	Cálculo de la corriente de arco	24
6.3	Cálculo de la energía incidente	26
6.4	Normalizar la energía incidente.....	27
6.5	Cálculo del límite de arco eléctrico.....	28
6.6	Interpretación de estudio de arco eléctrico	28
7	REDUCCIÓN DE TIEMPO DE ARCO CON EQUIPO SEL.....	29
7.1	Disparo rápido de bus	29
7.2	Sobre corriente durante mantenimiento	31
7.3	Sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente	33
8	APLICACIÓN DE METODO DE CALCULO DE ARCO ELÉCTRICO	38
8.1	Obtener datos del sistema.....	39
8.2	Datos para obtener corriente de corto circuito.....	39
8.3	Obtener corriente de arco eléctrico	41
8.4	Obtener energía incidente	42
8.5	Ajustar energía incidente	43
8.6	Límite de arco.....	45
9	GUÍA DE DISEÑO DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO.....	46
9.1	Sensores ópticos	46
9.2	Configuraciones del sistema	51
9.3	Consideraciones para pruebas en campo.....	57
10	CONCLUSIONES	60
11	REFERENCIAS.....	61

1 INTRODUCCIÓN

La electricidad se ha convertido en una parte integral de nuestras vidas en la actualidad, tanto en nuestra casa, como en el lugar de trabajo, pero sigue siendo muy peligrosa si no se usa de manera segura.

Comprender la naturaleza y las consecuencias de los peligros de la electricidad proporciona el ímpetu para desarrollar y seguir prácticas de trabajo eléctricamente seguras. Durante la última década, se ha realizado un esfuerzo considerable en el objetivo de establecer entornos de trabajo más seguros.

Las tragedias humanas, sus efectos y los costos totales de un accidente eléctrico, especialmente riesgos de arco eléctrico y descarga eléctrica, están bien documentados en los Estados Unidos. Tanto la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) como la National Fire Protection Association (NFPA) 70E están logrando importantes avances para mejorar la seguridad eléctrica en el lugar de trabajo y para promover la conciencia en la industria. A pesar de estos esfuerzos, continúan ocurriendo accidentes eléctricos de forma regular. Además, todavía hay empresas que no conocen o no entienden sus obligaciones de proporcionar a los empleados un lugar de trabajo eléctricamente seguro.

Al contrario de Estados Unidos donde se están tomando acciones específicas para la protección contra arco eléctrico, en México, se deja a las empresas la responsabilidad de proteger a los trabajadores de acuerdo con los ambientes de trabajo [1].

En esta norma los puntos que refieren a esta protección son los siguientes:

- 5.2 Identificar y analizar los riesgos de trabajo a los que están expuestos los trabajadores por cada puesto de trabajo y área del centro laboral.
- 5.3 Determinar el equipo de protección personal, que deben utilizar los trabajadores en función de los riesgos de trabajo a los que puedan estar expuestos
- 5.8 Identificar y señalar las áreas del centro de trabajo en donde se requiera el uso obligatorio de equipo de protección personal.

Un programa de seguridad eléctrica puede ser una manera de proteger a los empleados de accidentes y lesiones causadas por la electricidad en el lugar de trabajo, pero estos a menudo están desactualizados o no se provee el entrenamiento adecuado y frecuente a los empleados, por lo que por lo general quedan solo en el papel.

Además del programa de seguridad es necesario implementar otros métodos para garantizar la seguridad de las personas y los equipos de los accidentes eléctricos.

1.1 Historia del estudio del arco eléctrico

En 1982, el Dr. Ralph H. Lee escribió su artículo “The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burn” [2], en donde explicó que en ese entonces todo el mundo estaba consciente de los accidentes y consecuencias de los choques eléctricos, pero poco se hablaba de otro tipo de accidente que se producía sin necesidad de contacto entre la persona con el equipo energizado, se refirió a esto como la radiación que produce quemaduras derivada de un arco eléctrico producido en un corto circuito ocasionado por una falla en el aislamiento que junto con el láser, son las dos cosas más calientes en la tierra, pudiendo alcanzar hasta cuatro veces la temperatura de la superficie del sol (20,000°K). Para producir quemaduras fatales basta con estar a una distancia de 5ft (1.5 m), la cual, los trabajadores de la industria eléctrica por lo general están dentro de esa distancia. A partir de entonces, la industria comenzó a tomar consciencia de estos peligros y se empezó a trabajar en formas de mitigación del mismo.

A mediados de la década de los años noventa, la NFPA 70E comenzó a analizar los cálculos de análisis del arco eléctrico para incluirlos para en las normas para establecer los límites de protección contra el arco eléctrico. En la misma década los fabricantes de equipos de protecciones eléctricas iniciaron a desarrollar productos para mitigar los efectos de los daños causados por accidentes derivados por Arco Eléctrico.

1.2 Antecedentes

¿Porque es importante la protección contra arco eléctrico?

Como se mencionó previamente, en los Estados Unidos se tienen muy bien identificados y documentados los accidentes relacionados con la electricidad y podemos saber que cada año se tienen 30,000 accidentes relacionados con electricidad que no son fatales. 80% de los cuales son causados por arco eléctrico como se muestra en la Fig.1. Mas de 2,000 trabajadores son tratados cada año en clínicas especiales para quemaduras [3].

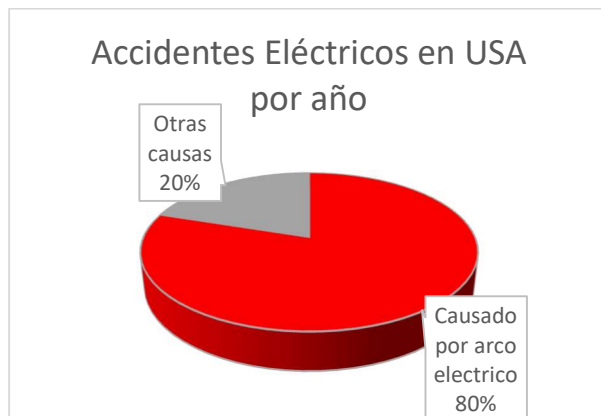


Fig. 1 Accidentes relacionados con electricidad al año en Estados Unidos [1]

Las siguientes organizaciones han establecido normas de seguridad sobre el arco eléctrico:

1. IEEE 1584 - 2002 Guide to Performing Arco Eléctrico Hazard Calculations [4]
2. OSHA Standards 29-CFR, Part 1910 [5]
3. NFPA 70 National Electrical Code. (NEC) [6]
4. NFPA 70E-2000 Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces [7]

El análisis de un estudio de arco eléctrico se debe realizar en asociación con los estudios de cortocircuito y de coordinación de protecciones, ya que con ambos estudios se obtiene la información necesaria para realizar el análisis de los riesgos del arco eléctrico. Los resultados del análisis son utilizados para identificar el límite de protección de flasheo y la energía incidente en las distancias de trabajo asignadas a través de cualquier punto o nivel en el sistema de generación eléctrica, transmisión y distribución. Así como especificar el adecuado equipo de protección personal (PPE por sus siglas en inglés), el cual debe ser del tipo y calidad para proteger todas las partes del cuerpo que estén expuestas al arco eléctrico.

1.3 Planteamiento del problema y objetivo

Como se ha mencionado, la cantidad de accidentes relacionados con arco eléctrico por año es una parte muy importante de todos los accidentes relacionados con la electricidad. Solamente en Estados Unidos alcanza la cantidad de 24,000 accidentes al año, por lo que es necesario tomar las medidas necesarias para proteger a las personas y a los equipos para evitar tragedias. Analizando las normas IEEE-1584 y NFPA 70E se puede determinar la exposición a la energía incidente a la que se encuentran expuestos los trabajadores en varios puntos del sistema eléctrico industrial en el que se encuentran laborando basado en la magnitud de la tensión de operación del sistema y de la corriente de corto circuito del mismo y el tiempo de libramiento de la falla determinado por la coordinación de protecciones.

Con ello poder determinar la categoría de riesgo de acuerdo al nivel de energía incidente y poder implementar las medidas de seguridad necesarias.

En este trabajo se revisarán algunos de los sistemas que se pueden encontrar en la industria y los esquemas de protección recomendados para que pueda ser tomado como una guía en el diseño de la protección contra Arco Eléctrico con los equipos SEL como son, selección de sensores de luminosidad, acomodo de los mismos y esquemas de operación/restricción de la protección.

2 ARCO ELÉCTRICO

2.1 Energía incidente

Es la cantidad de energía impresa sobre una superficie, a una cierta distancia de la fuente, generada durante un evento de arco eléctrico. El riesgo de una falla de arco eléctrico con explosión es en sí, un riesgo de quemadura. El riesgo de quemadura se mide con la energía calorífica disponible dentro del equipo, la energía incidente se mide en cal/cm². El umbral de quemadura de la piel humana es 1.2 cal/cm²., es utilizada para determinar el nivel de equipo de protección personal (EPP) requerido para proteger al personal de lesiones durante un evento de arco eléctrico [8].

2.2 ¿Qué es un arco eléctrico y cuales son sus causas?

Un arco eléctrico es un fenómeno en el que una descarga de corriente eléctrica deja su ruta prevista y viaja a través del aire de un conductor a otro, el cual es una fulguración, plasma o bola de fuego producida por el paso de altas corrientes eléctricas a través del aire que existe entre dos conductores, o bien, entre un conductor y la tierra. Pero el aire no es propiamente el conductor, la corriente fluye a través del vapor producido por el material en sus terminales.

De acuerdo con la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) 70E: Estándar para seguridad eléctrica en el lugar de trabajo, un Arco Eléctrico "es una condición peligrosa asociado con la liberación de energía causada por un arco eléctrico".

Las temperaturas que puede alcanzar un arco eléctrico pueden alcanzar los 20,000 °K en sus terminales (la única fuente de calor mayor conocida en la tierra es el láser, el cual puede alcanzar los 100,000 °K). La temperatura en el plasma o parte media del arco eléctrico puede alcanzar los 13,000 °K la cual es aproximadamente tres veces la temperatura de la superficie solar la cual es de 5,000 °K.

No hay materiales en la tierra que puedan soportar estas temperaturas, por lo que los materiales en las terminales no solo son fundidos, sino que pueden ser vaporizados. Durante una falla sólida, no hay arco, por lo que la temperatura no es de esos niveles, pero al tener una resistencia a la falla, la temperatura puede alcanzar el punto de fundición del material de las terminales, por lo que una falla sólida entre terminales puede evolucionar a una falla de arco eléctrico.

El vapor tiene una resistencia mucho mayor a la de un conductor sólido, pudiendo estar aproximadamente entre 30-40V/cm (77-100 V/in), valor el cual es mucho mayor que el de un conductor multihilos o sólido, cuyo valor es aproximadamente 1.5-3 V/m (0.5-1 V/ft).

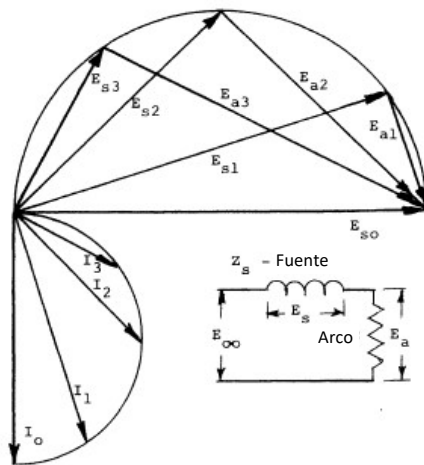


Fig.2 Diagrama de vectores de voltaje y corriente, con variación de voltaje de fuente y caída de voltaje [2]

En la Fig. 2 se puede ver cómo se comporta el valor de la corriente y el voltaje del sistema dependiendo de la distancia entre terminales.

E_{∞} es el voltaje del sistema, Z_s es la impedancia total de la falla y los subíndices son 0 para una falla sólida, 1 para una distancia pequeña entre terminales, 2 para una distancia media entre terminales y 3 para una distancia mayor entre terminales.

Como la impedancia de arco es casi puramente resistiva y la impedancia de la fuente es casi puramente inductiva, los vectores de caída de voltaje de la fuente (E_s) y caída de voltaje de arco (E_a) siempre estarán en cuadratura, por lo que se forma un semicírculo con diámetro E_{s0} , que para una falla sólida es igual a E_{∞} . Las corrientes de arco están representadas con los mismos subíndices, con los ángulos correspondientes de su E_s .

La energía en el arco es $E_a \times I$, el cual es 0 para una falla sólida, incrementa considerablemente para la condición de subíndice 1, alcanza el punto máximo para la condición de subíndice 2 y comienza a decaer para la condición de subíndice 3.

Como se puede observar en la Fig. 2, entre las condiciones de subíndices 2 y 3, la energía liberada comienza a decaer, por lo que se puede decir que al aumentar la distancia entre las terminales, se aumenta la distancia de arco, pudiendo convertirse en una falla de arco autoextinguible.

Un evento de arco eléctrico ocurre cuando el aislamiento por materiales o el aislamiento por aire entre componentes energizados dentro de un circuito eléctrico se ve comprometido.

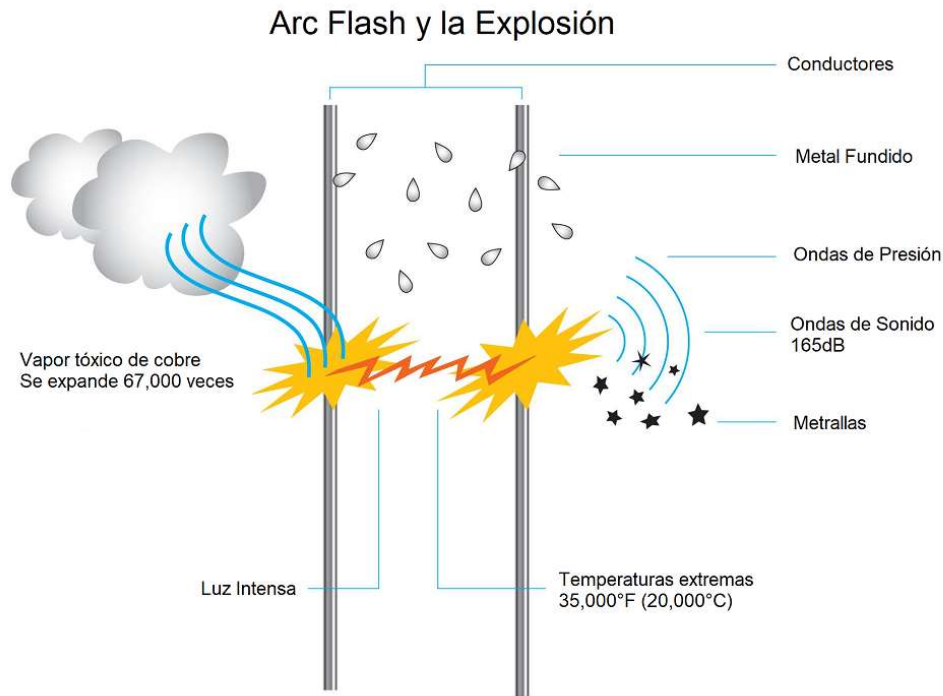


Fig. 3 Arco Eléctrico [19]

El arco eléctrico puede ocurrir debido a impurezas en los materiales de los equipos, polvo en el equipo eléctrico, corrosión, condensación o vapor en las cercanías o sobre equipos energizados, contacto accidental con zonas energizadas. También puede ser una falla evolutiva, la cual es una falla derivada del desgaste o debilitamiento de las resistencias de los aislamientos debido al escaso o nulo mantenimiento.

Como se muestra en la Fig.3 al producirse el arco eléctrico, se generan vapores tóxicos, una luz muy intensa, se alcanzan temperaturas extremas, ondas de sonido de hasta 165dB, ondas de presión y metrallas que son causadas por el material del equipo en el que se produce el arco. Esto se explica a continuación:

2.3 Luminosidad intensa

La exposición a una luz tan intensa puede causar daños tan graves en la piel como las quemaduras, lo que dificulta determinar si las quemaduras fueron causadas por la exposición a la luminosidad o por las extremas temperaturas causadas por el arco eléctrico.

Además, puede causar la ceguera permanente aun llevando equipo de protección.

2.4 Temperaturas extremas

Como ya se mencionó, la temperatura que puede alcanzar un arco eléctrico ronda los 20,000°K (35,500 °F), para ponerlo en comparativa con otras temperaturas conocidas podemos decir que [2]:

Soldadura por arco eléctrico: 1,900 °K (3,000 °F)

Superficie del Sol: 5,000 °K (8,500 °F)

Falla por arco eléctrico: 20,000 °K (35,500 °F)

3,000 °F que es la temperatura de una soldadura por arco es suficiente para fundir y alear los metales, la temperatura de la superficie del sol es suficiente para lograr una fusión nuclear, es realmente difícil tratar de asimilar y comprender lo que es estar expuesto a 35,500 °F que, aunque su duración es de fracciones de segundo durante una falla por arco eléctrico, las consecuencias son generalmente mortales si no se cuenta con el equipo de protección adecuado.

2.5 Ruido extremo

Como se muestra en la Fig. 3, el nivel de ruido puede alcanzar hasta los 165dB. Para tener una idea de cuán dañino puede ser eso, se debe saber que de acuerdo a la OMS (Organización Mundial de la Salud), el oído humano puede tolerar 55 decibeles sin ningún daño a su salud. Y dependiendo del tiempo de exposición, ruidos mayores a los 60 decibeles pueden provocar malestares físicos.

Si se toma en cuenta que las protecciones auditivas, por lo general, su nivel máximo de protección es hasta 115dB, se puede notar que, aunque el personal cuente con esta protección durante el momento de la falla, es muy posible que, dependiendo de su cercanía con el punto emisor de la falla por arco eléctrico, esta pueda generar sordera permanente en el trabajador.

2.6 Explosión

Como se muestra en la Fig.4, durante el momento de la falla por arco eléctrico, el cobre se funde y vaporiza, generando una expansión de su volumen hasta en 67,000 veces, lo cual genera una onda de presión muy grande que puede causar que el metal que no se fundió por completo salga disparado en forma de metralla con una velocidad que puede alcanzar las 700 mi/hr (1,100 km/hr)[19].

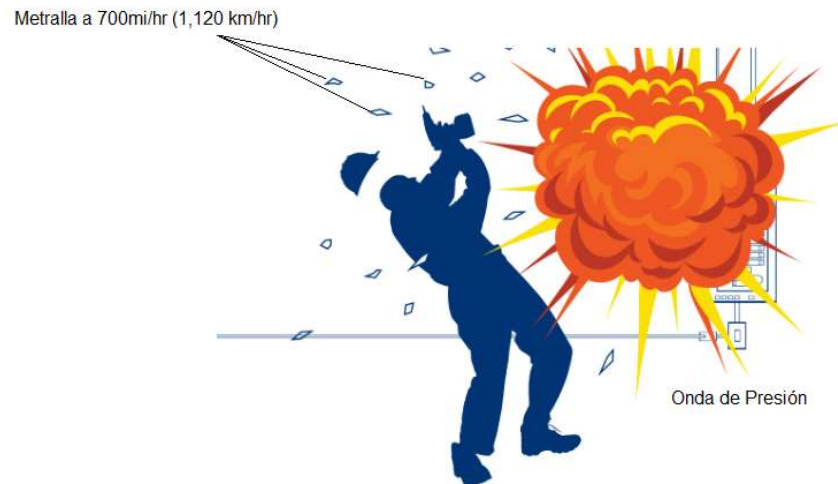


Fig.4 Explosión causada por una falla de arco eléctrico

3 LÍMITES DE PROXIMIDAD

De acuerdo a la NFPA 70E, existen 3 límites de proximidad hacia un equipo que pueda sufrir una falla por arco eléctrico, estos límites de aproximación que se muestran en la Fig.5 de son [7]:

- Límite de Restricción
- Límite de Aproximación
- Límite de Arco Eléctrico

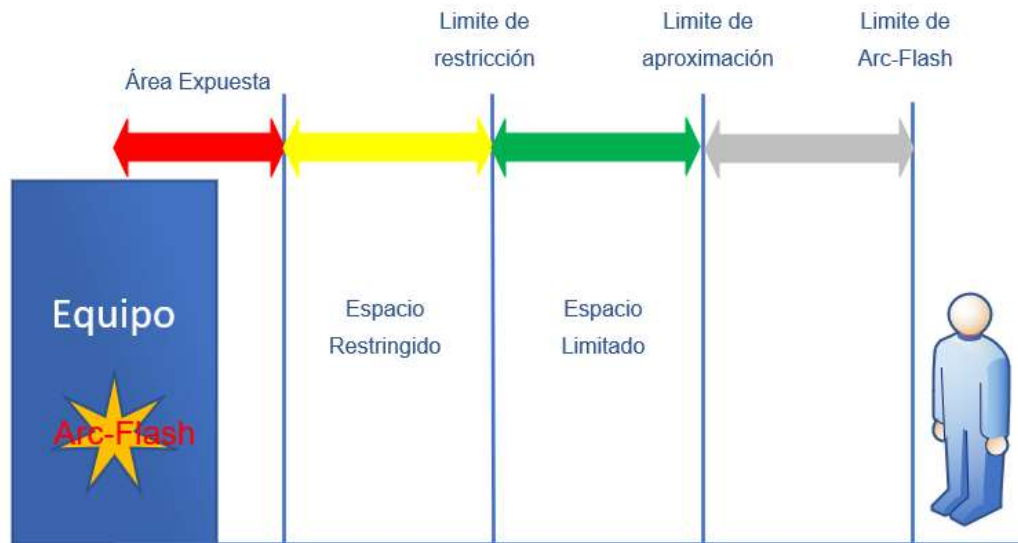


Fig.5 Límites de proximidad a una fuente de Arco Eléctrico

Estos límites se definen con base en cálculos definidos por la magnitud de voltaje del sistema.

Si bien, el tiempo de duración del arco y la magnitud de su corriente son 2 factores muy importantes al momento de determinar el peligro y magnitud del arco eléctrico, las lesiones están en función a la proximidad a la que se encuentre el trabajador al momento en el que se produzca la falla por arco eléctrico.

Es por eso por lo que es muy importante definir los límites de proximidad, ya que, si una falla por arco eléctrico se produce y no se encuentra personal dentro de estos límites de proximidad definidos, se evita una desgracia que puede ser la pérdida de la vida de un trabajador.

3.1 Límite de restricción

Es el área más cercana al circuito expuesto, para poder estar dentro de este límite. Se requiere ser un trabajador calificado, certificado con la capacitación necesaria para poder realizar los trabajos requeridos y contar con el EPP adecuado. Si alguien más requiere estar dentro de este límite, será necesario contar con un permiso de trabajo y la documentación requerida

3.2 Límite de aproximación

Es el límite que los trabajadores sin entrenamiento especializado no deben cruzar, a menos que cuenten con todo el equipo de protección apropiado y que estén continuamente escoltados por personal capacitado y con el entrenamiento especializado en la tarea que será realizada.

El estar dentro de esta área, en el momento en el que ocurra un arco eléctrico, causará en el trabajador quemaduras de tercer grado.

3.3 Límite de arco eléctrico

Esta es la distancia en la que la cantidad de energía liberada por una falla de arco eléctrico desciende del umbral donde podría producirse una quemadura de segundo grado al personal que no esté protegido por el EPP adecuado. Si se está dentro de este límite y el equipo está energizado, entonces se está potencialmente expuesto y se debe usar EPP.

Esta distancia es calculada y se toma como la distancia en la que la energía incidente cae hasta 1.2 cal/cm^2 , por lo que solo personal calificado y con el equipo de protección adecuado puede cruzar este límite.

3.4 Límites de arco eléctrico

En esta sección se resumen en la Tabla 1, las distancias críticas de cercanía de un usuario al equipo energizado en función de la tensión del sistema.

Tabla 1. Tabla de límites de aproximación a conductores eléctricos energizados para sistemas de corriente alterna. [7]

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Límite de aproximación				
Voltaje Nominal entre fases	Conductores expuestos móviles	Conductores expuestos fijos	Límite de restricción	Límite Prohibido
50 V	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
50 V – 300 V	3.0 m (10 ft. 0 in.)	1.0 m (3 ft. 6 in.)	Evitar Contacto	Evitar Contacto
301 V – 750 V	3.0 m (10 ft. 0 in.)	1.0 m (3 ft. 6 in.)	0.3 m (1 ft. 0 in.)	25 mm (0 ft. 1 in.)
751 V – 1.5 KV	3.0 m (10 ft. 0 in.)	1.5 m (5 ft. 0 in.)	0.7 m (2 ft. 2 in.)	0.2 m (0 ft. 7 in.)
15.1 KV – 36 KV	3.0 m (10 ft. 0 in.)	1.8 m (6 ft. 0 in.)	0.8 m (2 ft. 7 in.)	0.3 m (0 ft. 10 in.)
36.1 KV – 46 KV	3.0 m (10 ft. 0 in.)	2.5 m (8 ft. 0 in.)	0.8 m (2 ft. 9 in.)	0.4 m (1 ft. 5 in.)
46.1 KV- 72.5 KV	3.0 m (10 ft. 0 in.)	2.5 m (8 ft. 0 in.)	1.0 m (3 ft. 3 in.)	0.7 m (2 ft. 2 in.)
72.6 KV – 121 KV	3.3 m (10 ft. 8 in.)	2.5 m (8 ft. 0 in.)	1.0 m (3 ft. 4 in.)	0.8 m (2 ft. 9 in.)
138 KV – 145 KV	3.4 m (11 ft. 0 in.)	3.0 m (10 ft. 0 in.)	1.2 m (3 ft. 10 in.)	1.0 m (3 ft. 4 in.)
161 KV 169 KV	3.6 m (11 ft. 8 in.)	4.0 m (13 ft. 0 in.)	1.3 m (4 ft. 3 in.)	1.1 m (3 ft. 9 in.)
230 KV – 242 KV	4.0 m (13 ft. 0 in.)	4.7 m (15 ft. 4 in.)	1.3 m (4 ft. 3 in.)	1.6 m (5 ft. 2 in.)
345 KV – 363 KV	4.7 m (15 ft. 4 in.)	5.8 m (19 ft. 0 in.)	2.8 m (9 ft. 2 in.)	2.6 m (8 ft. 8 in.)
500 KV – 550 KV	5.8 m (19 ft. 0 in.)	5.8 m (19 ft. 0 in.)	3.6 m (11 ft. 10 in.)	3.5 m (11 ft. 4 in.)
765 KV – 800 KV	7.2 m (23 ft. 9 in.)	7.2 m (23 ft. 9 in.)	4.9 m (15 ft. 11 in.)	4.7 m (15 ft. 5 in.)

Esta es una tabla de la NFPA 70E que muestra los límites de aproximación a conductores energizados por niveles de tensión. Los cálculos de energía incidente en el sistema determinan el EPP requerido para poder trabajar en dicho sistema.

Esta EPP debe estar correctamente determinada ya que, si es mayor a la realmente requerida, todo el EPP que porte el trabajador no le permitirá trabajar cómodamente, lo cual puede causar un contacto accidental con conductores energizados, pero si, por el contrario, el equipo es menor al realmente requerido, las consecuencias de un accidente de arco eléctrico pueden ser fatales. Es importante mencionar, que estas distancias se deben tomar solo como referencia en caso de no contar con un estudio de arco eléctrico.

Siempre se debe tomar las distancias resultantes del estudio, ya que las condiciones particulares pueden cambiar significativamente las distancias.

4 EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL (EPP)

El equipo de protección personal (EPP), es el equipo o dispositivos que evita que una persona tenga un contacto directo con los peligros de los ambientes riesgosos, los cuales pueden generar lesiones y enfermedades.

Para combatir los riesgos de accidentes y de perjuicios para la salud, resulta prioritaria la aplicación de medidas técnicas y organizativas destinadas a eliminar los riesgos en su origen o a proteger a los trabajadores mediante disposiciones de protección colectiva. En el caso de la seguridad, los EPP actúan reduciendo las consecuencias derivadas de la materialización del riesgo.

4.1 Tipos de EPP

El equipo de protección personal se clasifica por el área del cuerpo a la cual protege, por los tipos de peligros y tipo de accesorio que es. Una sola prenda o accesorio puede proporcionar múltiples formas de protección, como, por ejemplo: botas de seguridad, pueden tener casquillo para proteger contra daño por golpes o aplastamiento, tener revestimiento o goma para protección contra agua y productos químicos, tener reflejantes para ser visibles en la oscuridad, resistencia al calor y resistividad eléctrica para la protección contra descargas eléctricas.

Los equipos de protección deben seleccionarse basado en los peligros que el personal que lo utilice encontrará o podrá encontrar en su ambiente de trabajo mientras realiza una actividad específica.

Se pueden mencionar como tipos de protección:

- Protección para respiración
- Protección para la piel
- Protección ocular
- Protección auditiva

Como se sabe los EPP no proporcionan una seguridad total por lo que, si es posible, se debe minimizar el riesgo antes.

4.2 Categorías de EPP

Para poder definir la categoría de EPP que es requerida en un ambiente de trabajo específico, es necesario recordar que para los riesgos de accidentes de arco eléctrico y la selección del EPP apropiado, se debe basar en la energía incidente del sistema en los límites de trabajo.

Para poder relacionar esa energía incidente con el nivel de EPP requerido, se debe recordar que el EPP seleccionado es con base en la energía incidente para causar una quemadura de segundo grado en el trabajador.

Las calorías son la medida de la energía. Es por eso por lo que los EPP contra arco eléctrico vienen clasificados en “calorías”.

Técnicamente una caloría es la cantidad de calor (energía calorífica) necesaria para elevar 1 gramo de agua pura 1°C a una presión de 1 ATM.

El cuerpo humano debe recibir 1.2 cal/cm² para sufrir una quemadura de segundo grado, por lo que este, es el valor referenciado para selección de la PPE, que esa puede soportar para solo permitir que esa cantidad de energía incidente sea impresa en el cuerpo del trabajador.

Este valor es equivalente a mantener un dedo sin protección sobre la flama de un encendedor durante 1 segundo a una distancia de 1 cm.

De acuerdo con la NFPA 70E, el EPP requerido por nivel de riesgo al que se encuentre expuesta una persona se categoriza en 5 niveles, de acuerdo con siguiente tabla:

Tabla 2. Características de equipo de protección personal

Categoría de Riesgo de Arco Eléctrico	Rango calculado de energía incidente	Nivel mínimo de EPP requerido	Equipo requerido
0	0 - 1.2 cal/cm ²	N/A	Algodón 4.5 - 14 oz/yd ² no tratado
1	1.2+ - 4 cal/cm ²	4 cal/cm ²	Camisa y pantalón u overol resistente a fuego
2	4+ - 8 cal/cm ²	8 cal/cm ²	Camisa y pantalón u overol resistente a fuego, más ropa interior de algodón.
3	8+ - 25 cal/cm ²	25 cal/cm ²	Camisa y pantalón u overol resistente a fuego o equivalente, más ropa interior de algodón.
4	25+ - 40 cal/cm ²	40 cal/cm ²	Camisa y pantalón u overol resistente a fuego o equivalente más traje multicapas, más ropa interior de algodón.

4.3 EPP nivel 0

Equipo requerido:

- Ropa de algodón que no se derrita o funda.
- Camisa de manga larga.
- Pantalones largos.
- Lentes de seguridad.
- Tapones auditivos.
- Guantes de cuero.

Este nivel como lo muestra la tabla de categorías es para exposición a energía incidente de un nivel máximo de 1.2 cal/cm² a una distancia de trabajo definida de 18 in. de la fuente, sin contar los brazos.

4.4 EPP nivel 1

Equipo requerido:

- Ropa resistente al fuego (FR).
- Camisa de manga larga con certificación FR.
- Pantalones largos con certificación FR.
- Overol con certificación FR.
- Lentes de seguridad.
- Mascara protectora.
- Tapones auditivos.
- Guantes de cuero.
- Casco.
- Zapatos de seguridad de cuero.

Este nivel como lo muestra la tabla de categorías es para exposición a energía incidente de un nivel entre 1.2+ a 4 cal/cm² a una distancia de trabajo definida de 18 in. de la fuente, sin contar los brazos.

Las principales diferencias con el nivel 0 de EPP son que se debe utilizar ropa interior de algodón y que la ropa tiene que contar con certificación Fire Resistant (FR) para hasta 4 cal/cm².

4.5 EPP nivel 2

Equipo requerido:

- Ropa resistente al fuego (FR).
- Ropa interior de algodón.
- Camisa de manga larga con certificación FR.
- Pantalones largos con certificación FR.
- Overol con certificación FR.
- Chaqueta con certificación FR.
- Lentes de seguridad.
- Mascara protectora.
- Tapones auditivos.
- Guantes de cuero.
- Casco.
- Zapatos de seguridad de cuero.

Este nivel como lo muestra la tabla de categorías es para exposición a energía incidente de un nivel entre 4+ a 8 cal/cm² a una distancia de trabajo definida de 18 in. de la fuente, sin contar los brazos.

Las principales diferencias con el nivel 1 de EPP es que se debe adicionar una chaqueta protectora y la ropa tiene que contar con certificación Fire Resistant (FR) para hasta 8 cal/cm².

4.6 EPP nivel 3

Equipo requerido:

- Ropa resistente al fuego (FR).
- Ropa interior de algodón.
- Camisa de manga larga con certificación FR.
- Pantalones largos con certificación FR.
- Overol con certificación FR.
- Chaqueta con certificación FR.
- Capucha para cubrir la cabeza con certificación FR.
- Lentes de seguridad.
- Mascara protectora.
- Tapones auditivos.
- Guantes de cuero.

- Casco.
- Funda ignifuga para el casco de seguridad.
- Zapatos de seguridad de cuero.

Este nivel como lo muestra la tabla de categorías es para exposición a energía incidente de un nivel entre 8+ a 25 cal/cm² a una distancia de trabajo definida de 18 in. de la fuente, sin contar los brazos.

Las principales diferencias con el nivel 2 de EPP es que se debe adicionar el uso de una escafandra protectora, el casco debe llevar una cubierta ignifuga y la ropa tiene que contar con certificación Fire Resistant (FR) para hasta 25 cal/cm².

4.7 EPP nivel 4

Equipo requerido:

- Ropa resistente al fuego (FR).
- Ropa interior de algodón.
- Camisa de manga larga con certificación FR.
- Pantalones largos con certificación FR.
- Overol con certificación FR.
- Chaqueta de traje con certificación FR.
- Pantalones de traje con certificación FR.
- Protector facial de la capucha del traje con certificación FR.
- Capucha para cubrir la cabeza con certificación FR.
- Lentes de seguridad.
- Mascara protectora.
- Tapones auditivos.
- Guantes de cuero.
- Casco.
- Funda interior ignifuga para el casco de seguridad.
- Zapatos de seguridad de cuero.

Este nivel como lo muestra la tabla de categorías es para exposición a energía incidente de un nivel entre 25+ a 40 cal/cm² a una distancia de trabajo definida de 18 in. de la fuente, sin contar los brazos.

Las principales diferencias con el nivel 3 de EPP es que se debe adicionar el uso de un traje multicapas con certificación FR, el casco debe llevar una cubierta ignifuga interior y la ropa tiene que contar con certificación Fire Resistant (FR) para hasta 40 cal/cm².

4.8 Energía incidente superior a nivel 4

Como se muestra en la tabla de categorías de EPP, la categoría máxima es el nivel 4, el cual cuenta con una protección hasta 40 cal/cm². Siendo así este el nivel máximo que el EPP puede proteger al trabajador, por lo que la NFPA 70E requiere que para ambientes de trabajo donde se puede estar expuesto a una energía incidente mayor a 40 cal/cm², los trabajos deben realizarse con los equipos des energizados.

CATEGORÍA DE PPE 1	CATEGORÍA DE PPE 2	CATEGORÍA DE EPP 3	CATEGORÍA DE EPP 4
CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 4 - 8 CAL/CM2	CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 8 - 25 CAL/CM2	CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO ENTRE 25 - 40 CAL/CM2	CLASIFICACIÓN DE ARCO MÍNIMO 40 CAL/CM2
ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO - Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos - Protector facial o capucha para traje aptos para arcos eléctricos - Chaqueta, parca, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) 	ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO - Camisa de manga larga y pantalones o traje entero aptos para arcos eléctricos - Capucha para traje o protector facial y pasamontañas aptos para arcos eléctricos - Chaqueta, parca, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) 	ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO - Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos - Capucha para traje apta para arcos eléctricos - Guantes aptos para arcos eléctricos - Chaqueta, parca, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) 	ROPA DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO - Según sea necesario: Camisa de manga larga, pantalones traje entero, chaqueta y pantalones de traje aptos para arcos eléctricos - Capucha para traje apta para arcos eléctricos - Guantes aptos para arcos eléctricos - Chaqueta, parca, gabardina o revestimiento para cascos aptos para arcos eléctricos (según sea necesario) 
OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN: - Casco - Lentes o gafas de seguridad - Protección auditiva (dentro del oído) - Guantes de cuero resistentes - Calzado de cuero (según sea necesario)	OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN: - Casco - Lentes o gafas de seguridad - Protección auditiva (dentro del oído) - Guantes de cuero resistentes - Calzado de cuero	OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN: - Casco - Lentes o gafas de seguridad - Protección auditiva (dentro del oído) - Calzado de cuero (según sea necesario)	OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN: - Casco - Lentes o gafas de seguridad - Protección auditiva (dentro del oído) - Calzado de cuero (según sea necesario)

Fig. 6. Categorías de Equipo de Protección Personal

5 ETIQUETADO SOBRE RIESGO DE ARCO ELÉCTRICO

La NFPA, detalla cómo cumplir con la norma de OSHA, 29 CFR 1910.333(a), mediante la Norma NFPA 70E.

Según la norma NFPA 70E, existen seis responsabilidades primarias que se deben cubrir en una planta. Estas responsabilidades incluyen:

1. Capacitación para los empleados
2. Un programa de seguridad escrito que se pueda llevar a cabo
3. Equipo de protección personal (EPP) disponible para los empleados
4. Herramientas aisladas
5. Cálculos de grado de peligro de arco eléctrico
6. Equipo debidamente etiquetado

El etiquetado de arco eléctrico es responsabilidad del empleador, no del fabricante ni del instalador del equipo, ya que el equipo puede ser instalado de varias maneras y por lo tanto puede tener diferentes niveles de peligro, dependiendo de la instalación realizada.

El etiquetado es obligatorio para cualquier equipamiento eléctrico que pueda llegar a necesitar evaluación, ajuste, servicio o mantenimiento mientras está activo, lo que generaría el potencial de un incidente de arco eléctrico.

La NFPA 70E requiere que el etiquetado sea de un tamaño mínimo de 4" X 6" para que pueda cumplir con el tamaño de letra requerido y debe ser colocada en un lugar visible para todo el personal que se acerque a realizar un trabajo o alguna inspección.



Fig.7 Ejemplo de una etiqueta de Arco Eléctrico

5.1 Encabezado de peligro o advertencia

La etiqueta debe contar con un encabezado de PELIGRO o ADVERTENCIA.

El encabezado de PELIGRO se debe colocar en color rojo cuando el voltaje es mayor a 600V o cuando la energía incidente es mayor a 40 cal/cm².

Si es menos a este umbral, el encabezado se coloca en color naranja con la leyenda ADVERTENCIA. [20]

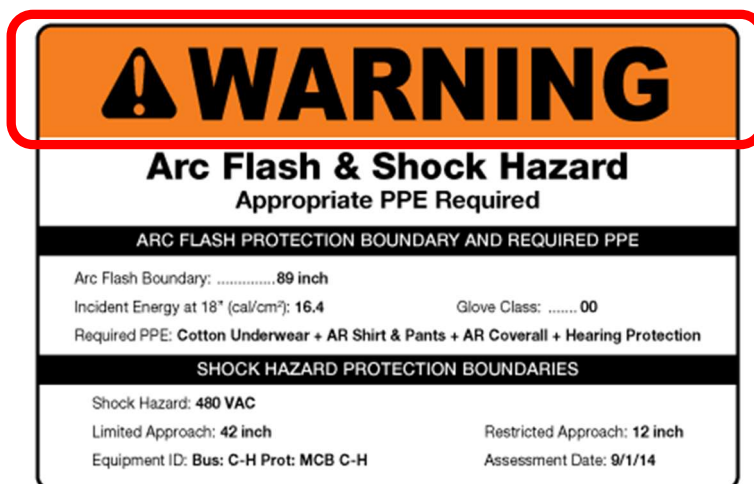


Fig.8 Ejemplo de una etiqueta de Arco Eléctrico con señal de ADVERTENCIA

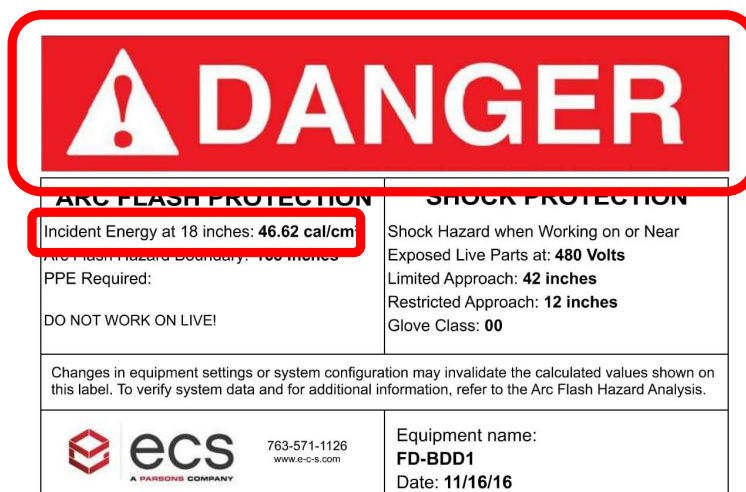


Fig.9 Ejemplo de una etiqueta de Arco Eléctrico con señal de PELIGRO

5.2 Indicación de energía incidente a:

La etiqueta debe contar con la indicación de la magnitud de la energía incidente a la distancia de trabajo, generalmente es considerada 18 pulgadas, la cual se considera a la distancia del punto energizado donde se puede originar el arco eléctrico al cuerpo (cabeza y/o torso) del trabajador que realiza la actividad asignada.

! WARNING	
Arc Flash & Shock Hazard Appropriate PPE Required	
ARC FLASH PROTECTION BOUNDARY AND REQUIRED PPE	
Arc Flash Boundary:89 inch	Glove Class:00
Incident Energy at 18" (cal/cm²): 16.4	
Required PPE: Cotton Underwear + AR Shirt & Pants + AR Coverall + Hearing Protection	
SHOCK HAZARD PROTECTION BOUNDARIES	
Shock Hazard: 480 VAC	
Limited Approach: 42 inch	Restricted Approach: 12 inch
Equipment ID: Bus: C-H Prot: MCB C-H	Assessment Date: 9/1/14

Fig.10 Indicación de magnitud de energía incidente a la distancia de trabajo

5.3 EPP requerido

Se debe indicar el EPP requerido de acuerdo con la categoría de arco eléctrico obtenida del estudio de Arco Eléctrico, de acuerdo con la NFPA 70E

! WARNING	
Arc Flash & Shock Hazard Appropriate PPE Required	
ARC FLASH PROTECTION BOUNDARY AND REQUIRED PPE	
Arc Flash Boundary:89 inch	Glove Class:00
Incident Energy at 18" (cal/cm ²): 16.4	
Required PPE: Cotton Underwear + AR Shirt & Pants + AR Coverall + Hearing Protection	
SHOCK HAZARD PROTECTION BOUNDARIES	
Shock Hazard: 480 VAC	
Limited Approach: 42 inch	Restricted Approach: 12 inch
Equipment ID: Bus: C-H Prot: MCB C-H	Assessment Date: 9/1/14

Fig.11 Indicación de EPP requerido

5.4 Límite de arco eléctrico

Es la distancia mínima que debe mantener el personal que no cuenta con el EPP indicado en la etiqueta. Aun así, con esta distancia, la persona recibiría máximo una quemadura de segundo grado.

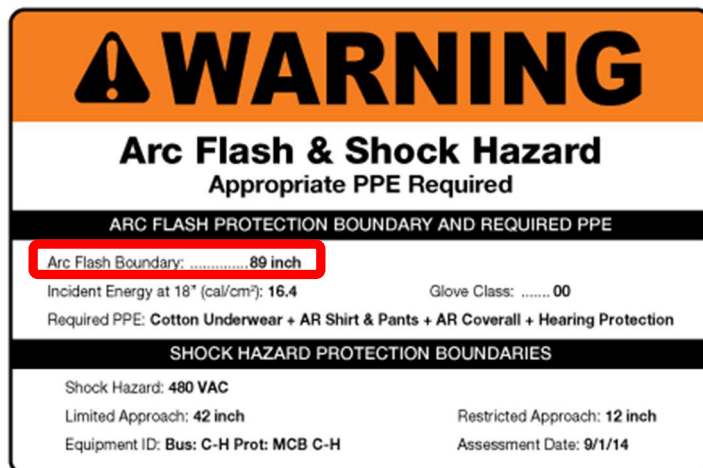


Fig.12 Indicación de límite de arco eléctrico

5.5 Riesgo de choque si se retira la tapa

Es el voltaje de operación del equipo.

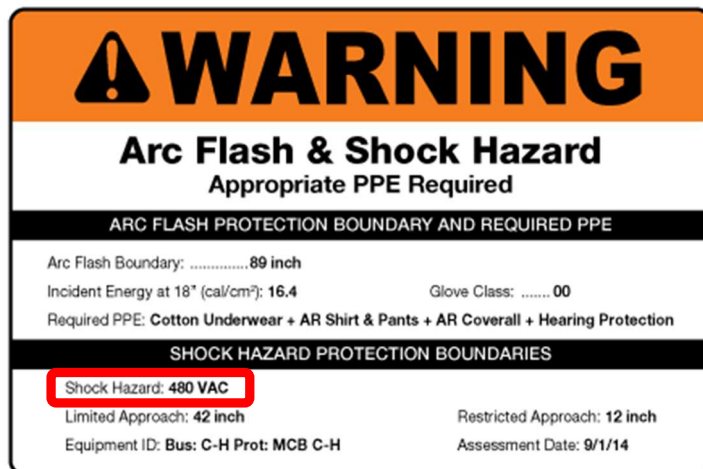


Fig.13 Indicación de riesgo de choque eléctrico

5.6 Indicación de límite de restricción y límite de aproximación

Es la indicación de las distancias de límites de restricción y aproximación calculados de acuerdo con las características del sistema instalado.

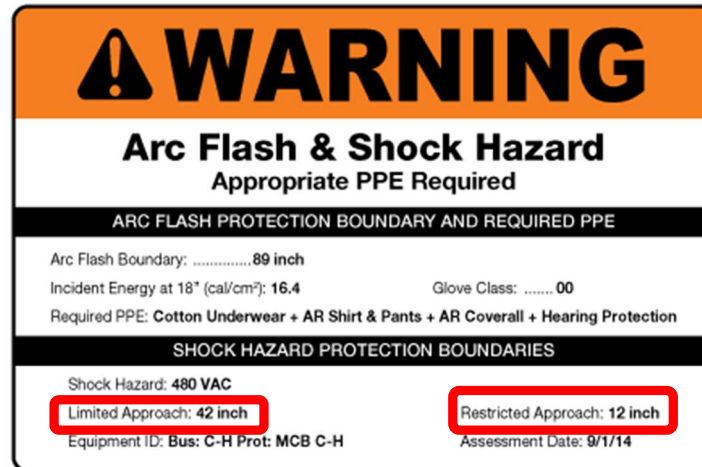


Fig.14 Indicación de límites de restricción y aproximación

6 MÉTODO DE CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO

Los estudios de arco eléctrico tienen como objetivo determinar el nivel de energía calorífica resultante de una falla por arco eléctrico, para iniciarlo se debe contar con los estudios de corto circuito del sistema. También se deben considerar los métodos de mitigación (protecciones y sus coordinaciones), el cálculo de arco eléctrico se realiza con base en las metodologías desarrolladas por la NFPA 70E y la IEEE-1584-2002.

El resultado de este estudio, son los datos de riesgo y categorización de riesgo de arco, para poder imprimir la etiqueta de advertencia o peligro, así como poder identificar el EPP requerido para poder trabajar en el equipo, o si el nivel de arco es demasiado elevado, tener la instrucción de que en el equipo solo se puede trabajar cuando este desenergizado.

Los pasos generales para desarrollar el estudio de arco son:

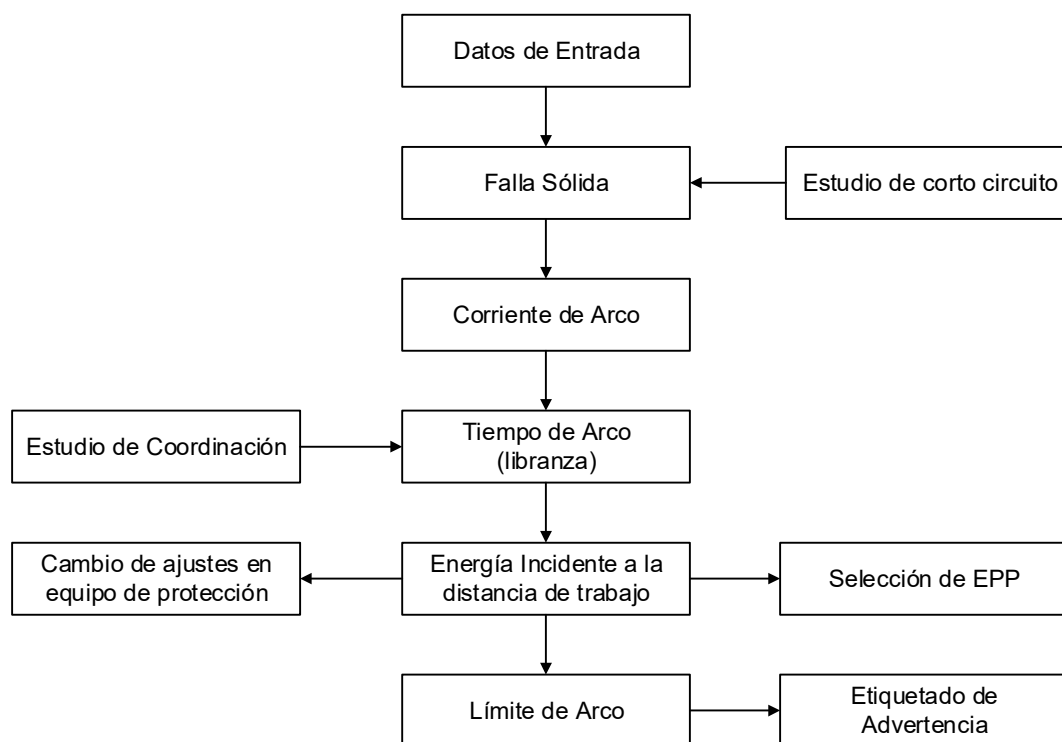


Fig. 15. Proceso de análisis para protección contra arco eléctrico [13].

6.1 Recopilación de datos del sistema

Se debe incluir toda la información disponible del sistema, como máximos y mínimos de las corrientes de corto circuito, características de los equipos instalados, características de los conductores, tensiones de operación del sistema, etc. Esto debe ser proporcionado por la empresa dueña del sistema.

Para el estudio de arco eléctrico solo se consideran las corrientes de falla trifásica en cada uno de los puntos de interés, una de las razones para tomar en consideración solo las corrientes trifásicas es que generalmente generan la energía de cortocircuito más alta posible y representan el caso más severo, otra razón importante es que la experiencia ha demostrado que las fallas de arco en equipo o al aire que comienzan como fallas de fase a tierra pueden progresar muy rápidamente a fallas trifásicas a medida que el aire se ioniza a través de las fases, esta progresión de monofásico a trifásico ocurre generalmente en unos pocos ciclos.

En el caso de un sistema que cuente con múltiples alimentadores se debe tener en cuenta la porción de la corriente que fluye por cada alimentador para determinar el tiempo de despeje de la falla.

6.2 Cálculo de la corriente de arco

De acuerdo con la IEEE-1584-2002, para calcular la corriente de arco, se debe conocer cuál es el valor de cortocircuito de una falla sólida trifásica, el valor de la corriente de arco estará alrededor del 50% del valor de la falla trifásica.

Las fórmulas de acuerdo con la IEEE-1584 son:

Sistemas menores a 1 KV

$$\log(I_a) = K + 0.662 \cdot \log(I_{bf}) + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \cdot \log(I_{bf}) - 0.00304 G \cdot \log(I_{bf}).$$

Sistemas 1 KV < 15 KV

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

$$I_a = 10^{\log I_a}$$

Donde

I_a = Corriente de Arco en kA

I_{bf} = Corriente de Cortocircuito Trifásica (simétrica rms kA)

k = - 0.153 en Sistema abierto y - 0.097 para arcos dentro de una caja

V = Voltaje del sistema en kV

G = Distancia entre conductores (mm)

Estos valores se deben de obtener del sistema instalado, sin embargo, la IEEE proporciona una tabla con valores típicos para la distancia entre conductores basado en las características más comunes de los sistemas disponibles.

Tabla 3. Factores por clase de equipo y nivel de voltajes [4]

Voltaje del Sistema en KV	Tipo de equipo	Espacio típico entre conductores en mm	Factor de distancia X
0.208 a 1	Abierto	10 - 40	2.000
	Tablero de media tensión	32	1.473
	CCM's y paneles	25	1.641
	Cables	13	2.000
> 1 a 5	Abierto	13 - 102	2.000
	Tablero de media tensión	102	0.973
	Cables	13	2.000
> 5 a 15	Abierto	13 - 153	2.000
	Tablero de media tensión	153	0.973
	Cables	13	2.000

6.3 Cálculo de la energía incidente

Los niveles reales de energía incidente dependerán de una variedad de condiciones ambientales tales como la temperatura, humedad y la geometría de los equipos. Para poder calcular la energía incidente, se debe primero definir una distancia de trabajo, la cual es la distancia de la fuente del arco a la cara o pecho del trabajador, la que normalmente puede ser 18" o 24".

Cálculo de la Energía Incidente (cal/cm²): Es la cantidad de energía impresa en una superficie a cierta distancia de la fuente.

$$\log E_{in} = k_1 + k_2 + [1.081 \times (\log I_a)] + 0.0011G$$

$$E_{in} = 10 \log E_{in}$$

Donde

E_{in} = Energía incidente

k_1 = -0.792 para arcos al aire libre y -0.555 para arcos dentro de una caja

k_2 = 0 para sistemas no aterrizados o con gran resistencia de aterrizamiento y -0.113 para sistemas aterrizados

G = Distancia entre conductores

Esta fórmula aplica para sistemas < 1KV y sistemas entre 1 – 15 KV y esta ajustada a una distancia de trabajo de 24" y un tiempo de libranza de 0.2 seg.

6.4 Normalizar la energía incidente

En caso de que la distancia de trabajo y tiempo de arco sean distintos de 24" y 0.2 s respectivamente, se debe ajustar la energía incidente a una distancia de trabajo específica y tiempo de arco específico.

Esto se logra con la fórmula:

$$E_i = 4.184 \times C_f \times E_{in} [(t/0.2) \times (610/D_w)^x]$$

Donde

E_i = Energía incidente específica

C_f = Factor de cálculo (1 para voltajes mayores a 1KV y 1.5 para voltajes debajo de 1KV)

t = Tiempo de arco (s)

D_w = Distancia de trabajo

E_{in} = Energía incidente normalizada a 0.2 s y 24 in

X = Factor de distancia (ver Tabla 3)

La energía producida por un evento de arco eléctrico es proporcional a la tensión, corriente y duración del evento ($V \cdot I \cdot t$). Por lo que, reduciendo el tiempo de arco, que es realmente en lo que las protecciones eléctricas pueden ayudar, reduciremos significativamente la energía incidente liberada por la falla de arco eléctrico.

6.5 Cálculo del límite de arco eléctrico

Límite de Distancia en que se puede estar expuesto a una quemadura de segundo grado o a una energía incidente de 1.2 cal/cm² en caso de que ocurra un arco eléctrico.

$$DB = [4.184 \times Cf \times Ein \times (t / 0.2) \times (610^x / EB)]^{1/x}$$

Donde

DB = Distancia del arco en mm

EB = Energía Incidente a los límites del arco, típicamente 1.2 cal/cm² o 5 Joule/cm²

Ein = Energía Incidente normalizada, de hoja de cálculo A

Cf = Factor de Cálculo

t = Tiempo de duración del arco en de acuerdo con la curva de operación de la protección de sobre corriente

X = Distancia de exposición de acuerdo con Tabla 1

Conversiones: 1 inch = 25.4 milímetros 0.24 cal / cm² = 1 Joule/cm²

6.6 Interpretación de estudio de arco eléctrico

Obteniendo estos datos, y dependiendo de las técnicas de mitigación instaladas en nuestro sistema para la reducción del tiempo de arco, ya se cuenta con la información necesaria para poder elaborar el plan de riesgos, categorizar el nivel de riesgos y poder llenar la etiqueta de Arco Eléctrico.

Además, con los datos de la energía incidente liberada en caso de una falla por arco eléctrico y teniendo las distancias de trabajo de nuestro sistema en particular, es posible selecciona el EPP adecuado para los trabajadores que laboraran en el equipo, y proporcionar sugerencias o acciones para disminuir riesgos en puntos con alta energía incidente. Esto se hace por medio de propuestas en cambios de coordinación de protecciones, cambio de equipos de protección, etc.

7 REDUCCIÓN DE TIEMPO DE ARCO CON EQUIPO SEL

La energía producida por un evento de arco eléctrico es proporcional a la tensión, corriente y duración del evento ($V \cdot I \cdot t$). Por lo que, reduciendo el tiempo de arco, que es realmente en lo que las protecciones eléctricas pueden ayudar, se reducirá significativamente la energía incidente liberada por la falla de arco eléctrico.

Existen principalmente 3 opciones en el diseño de protecciones para poder reducir el tiempo de arco y por lo tanto el nivel de energía incidente que será liberada en la situación de una falla de arco eléctrico:

1. Disparo rápido de bus
2. Sobre corriente durante mantenimiento
3. Sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente

7.1 Disparo rápido de bus

En la Fig.16 se puede ver la forma en que se realiza un esquema de disparo rápido de bus, en donde se muestra el flujo de la señal de bloqueo de alguno de los alimentadores a la fuente principal del sistema:

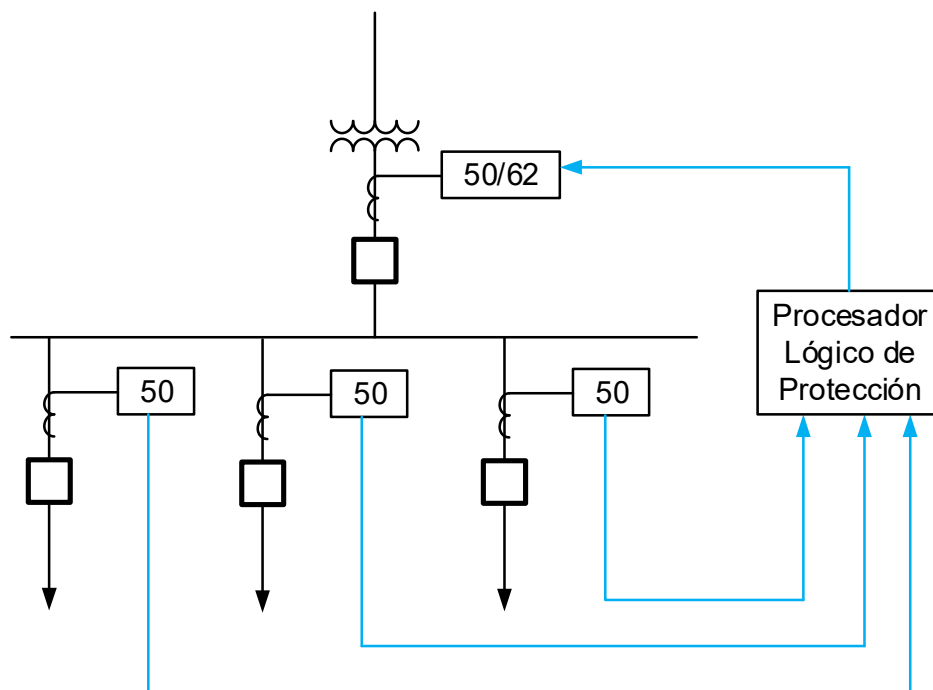


Fig. 16. Esquema de Disparo Rápido de Bus [17]

En este caso el estudio de coordinación de protecciones cobra gran importancia debido a que no existe diferencial de barras y aplica el llamado Fast Bus Tripping (FBT), o disparo rápido de bus, que consiste en que el esquema de protección debe estar asociado y coordinado de tal manera que los tiempos de disparo para sobre corriente o corto circuito sean aplicados con selectividad de acuerdo al lugar de la falla o disturbio, ya que un error en dicha coordinación, puede hacer que todas las cargas salgan de operación innecesariamente.

La lógica de operación de este esquema de protección consiste en que cuando una falla ocurre en alguno de los alimentadores, el alimentador asociado a la falla manda una señal de bloqueo a la protección principal 50/62 para que esta no opere, ya que es una falla externa al sistema, por lo que solo el relevador 50 asociado a la falla debe operar. Esto se repite para todos los alimentadores. En el caso de que la falla se encuentre en el bus principal, ninguna protección de alimentador enviará señal de bloqueo a la protección principal y esta tendrá permiso de acelerar su elemento 50 y liberar la falla en un menor tiempo. El tiempo de disparo para fallas en la barra en este sistema es de 3 ciclos, por lo que, para sistemas de 60 Hz, es de 48 ms, pero para el cálculo de la energía incidente que se liberara en una falla de arco eléctrico que este protegido con este esquema, no debemos olvidar adicionar el tiempo de operación del interruptor.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del DRB

Ventajas	Desventajas	Tiempo de Disparo
Bajo costo	Se requiere de más ajustes	< 48 ms + tiempo de operación del interruptor
Rápido	Mas complejo para probar y puede disparar el bus durante las pruebas	
Seguro		

7.2 Sobre corriente durante mantenimiento

Este esquema de protección es utilizado cuando se sabe de la presencia de personal que estará cerca del equipo para realizar trabajos en o cerca del equipo, ya sea mantenimiento o alguna otra actividad. Mediante un control manual se procede a deshabilitar el tiempo de coordinación de la protección asociada al equipo para de esta manera reducir el tiempo de operación de esta [9], reduciendo significativamente el tiempo de operación. De esta manera se reduce la magnitud de energía incidente liberada por una falla de arco eléctrico que pudiera suceder. Esto se debe a que al estar personal laborando cerca de los conductores energizados, la probabilidad de falla por arco causado por contacto accidental del trabajador, por dejar caer una herramienta que pueda fungir como conductor entre las fases, se incrementa.

Este esquema es más rápido que el DRB, y su implementación no requiere mucho costo, ya que solo se requiere un control manual, y el cableado asociado, en los relevadores, este se puede asociar a un botón del mismo relevador para control para el cambio de ajustes.

Una desventaja que tiene, es que al ser activado y desactivado manualmente por el personal que trabajará dentro de la zona restringida y/o área expuesta, este control es susceptible a permanecer activado, aun después de que los trabajos se terminaron y no hay personal dentro de las zonas de riesgo, esto podría ocasionar una descoordinación en los esquemas de protecciones y de esta manera perder selectividad de las mismas, pudiendo, en caso de falla, desconectar partes del sistema que no deberían ser sacadas de operación.

El tiempo de disparo para fallas en la barra en este sistema es de 24 ms, pero al igual que en el esquema DRB, para el cálculo de la energía incidente que se liberará en una falla de arco eléctrico que este protegido con este esquema, no se debe olvidar adicionar el tiempo de operación del interruptor.

En la Fig.17 se muestra el esquema de operación de sobre corriente durante mantenimiento, en el cual se puede ver que el control se realiza localmente en el área del sistema en la que se realizarán los trabajos o mantenimientos y en la cual estará personal.

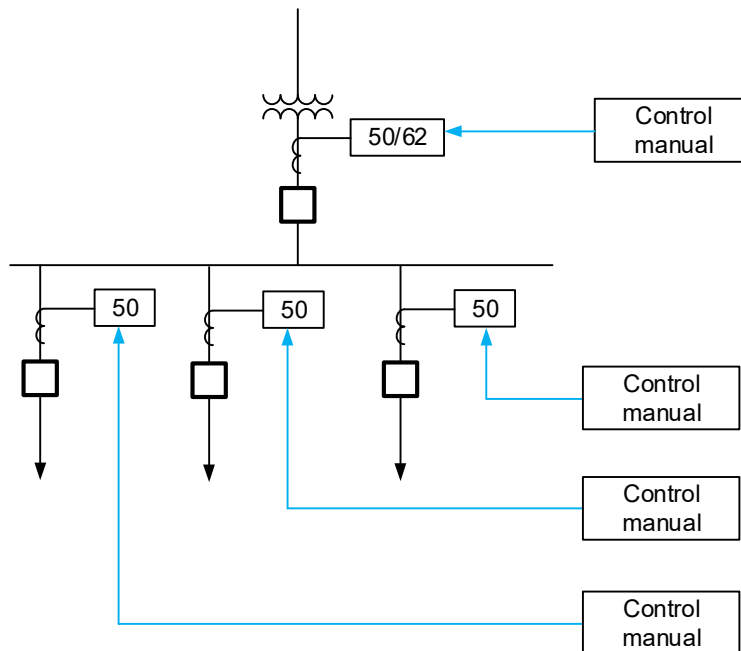


Fig. 17. Esquema de Sobre corriente durante mantenimiento

Tabla 5. Ventajas y desventajas del Sobre corriente durante mantenimiento

Ventajas	Desventajas	Tiempo de Disparo
Bajo costo	Perdida de coordinación de protecciones	< 24 ms + tiempo de operación del interruptor
Rápido	Puede quedarse activado por descuido / olvido	

7.3 Sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente

El esquema de protección por sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente funciona mezclando la detección de luz y de sobre corriente simultáneamente para proceder a realizar un disparo al interruptor asociado a la falla logrando así una reducción muy significativa en el tiempo de operación y por lo tanto en la magnitud de energía incidente que es liberada por esta falla.

De acuerdo con pruebas realizadas por Schweitzer Engineering Laboratories, se encontró que la diferencia de tiempo que existe entre corriente y luz es de 1.5ms, la corriente es censada primero.

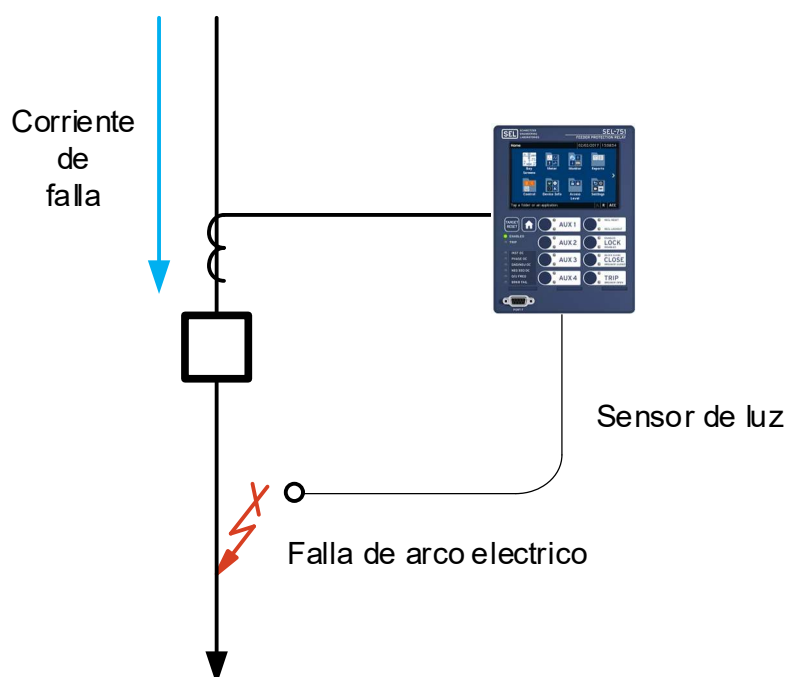


Fig. 18. Esquema de Sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente

A esta lógica se le llama algoritmo Time-Overlight (TOL)[10], con el cual se incrementa la velocidad de operación, y también la seguridad, ya que al no depender solamente de la sobre corriente, se puede discriminar entre fallas internas y externas al equipo, de manera que no se pierde la coordinación de protecciones del sistema.

Este algoritmo funciona como se muestra en la Fig. 19

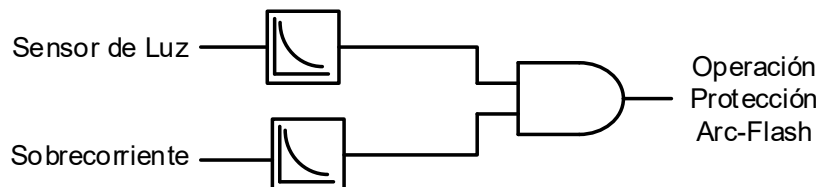


Fig. 19. Algoritmo Time-Overlight (TOL)[10]

Los elementos de sobre corriente, utilizan el muestreo con base en un convertidor A/D (Analógico/Digital), el cual es procesado 16 veces por ciclo, y cada muestra es comparada con el ajuste de pickup definido, al cual se adiciona un contador, el cual requiere que 2 muestreos consecutivos se encuentren por encima del ajuste establecido de pickup.

Estos sensores de sobre corriente no filtran los armónicos, lo que produce una tendencia natural de sobre alcance bajo condiciones de carga de altos armónicos.

Para evitar un levantamiento no intencional del pickup de ajuste de operación, se recomienda que el ajuste de 50PAFP y 50NAF sea al menos del doble de la carga máxima esperada del sistema.

Es esperado que exista una activación del elemento de sobre corriente durante energización, para la cual, para evitar una mala operación, se agrega la supervisión de luz.

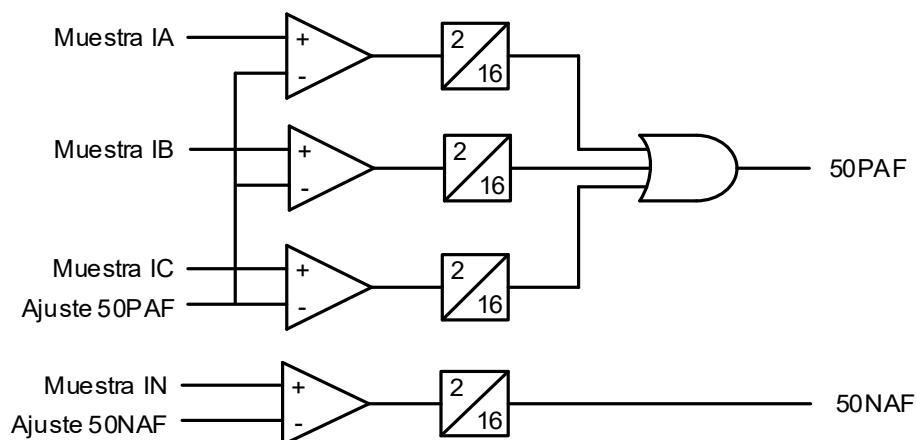


Fig. 20. Lógica de elemento de sobre corriente instantánea para protección contra arco eléctrico [10]

Para obtener la medición analógica de la intensidad de luz, se pueden conectar los sensores de fibra óptica plástica (no conductivos) para este propósito, y dependiendo del área que se quiera proteger, existen 2 opciones:

- Sensores puntuales
- Sensores de lazo

Estos sensores se conectan a los relevadores SEL de la siguiente manera:

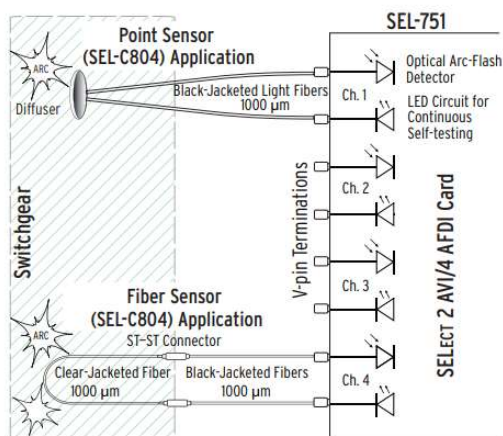


Fig. 21. Tipos y conexiones de sensores de luz [10].

Cada entrada está asociada a un elemento de tiempo inverso de sobre intensidad luminosa como se muestra en la Fig. 22. Los bits TOL1, TOL2...etc. indican que se ha mantenido una sobreintensidad luminosa el tiempo requerido por las curvas de sobreintensidad para operar los elementos.

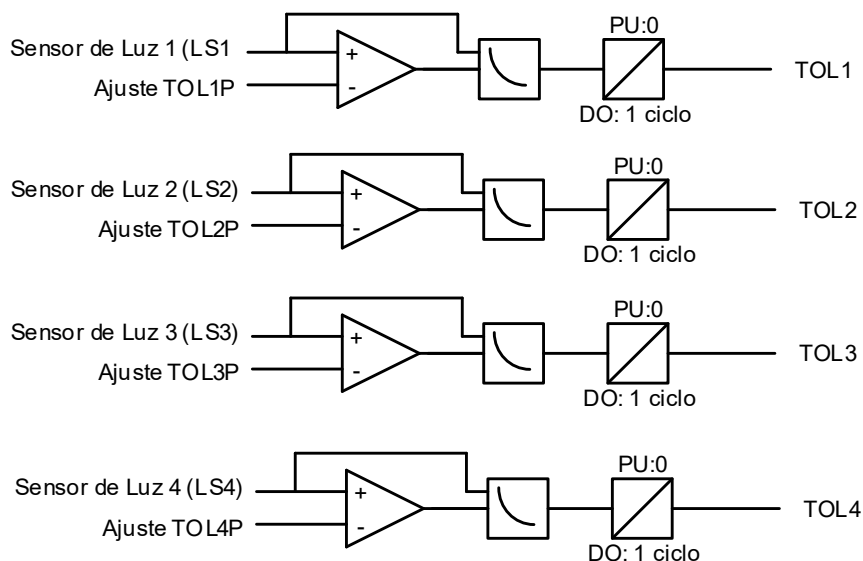


Fig. 22. Elementos de sobreintensidad luminosa de tiempo inverso en relevador SEL-751A [10]

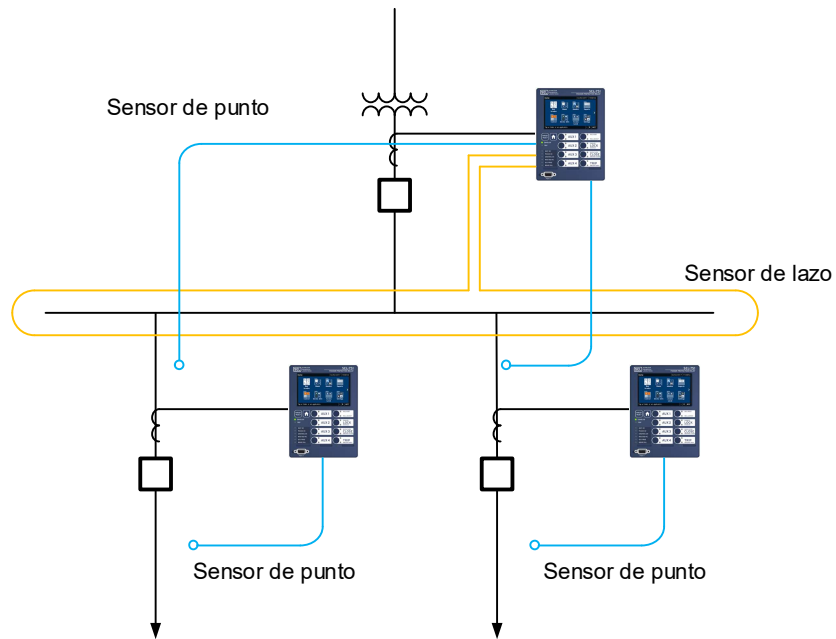


Fig. 22. Distribución de sensores de luz (Punto y Lazo) [15]

Para seleccionar que tipo de sensor se debe utilizar, la diferencia principal es que el sensor de lazo es una fibra desnuda que puede ser colocada a todo lo largo del área que se desea proteger. Esta fibra óptica es capaz de censar cualquier incremento de luz en todo lo largo de la fibra, por lo que puede ser usada por ejemplo a lo largo de todo el bus principal del tablero de media tensión.

El sensor de punto se utiliza para áreas confinadas, como pueden ser los cubículos de los interruptores o conexiones también, puede ser utilizado en las conexiones de cable a barras de cobre.

Los sensores de fibra óptica deben ser remplazados después de un evento de falla de arco eléctrico, estos son dañados en un tiempo de 2.5 ciclos, lo cual no impide que puedan mandar la señal al relevador antes de que sean totalmente dañados, porque como se mencionó anteriormente, la corriente lidera al sensor de luz por solamente 1.5ms [17]

El tiempo de detección/operación de esta protección, si se utiliza para el disparo una salida rápida (High speed output contact) el tiempo de disparo logra ser de 2 ms, sin embargo, si se utiliza un contacto de salida mecánica convencional, el tiempo de disparo ronda entre 5 – 8 ms.

Al igual que los esquemas de protección de disparo rápido de bus y de sobre corriente durante mantenimiento, a este tiempo se le debe adicionar el tiempo de apertura del interruptor, para así, poder obtener la magnitud de energía incidente que será liberada durante un evento de falla de arco eléctrico.

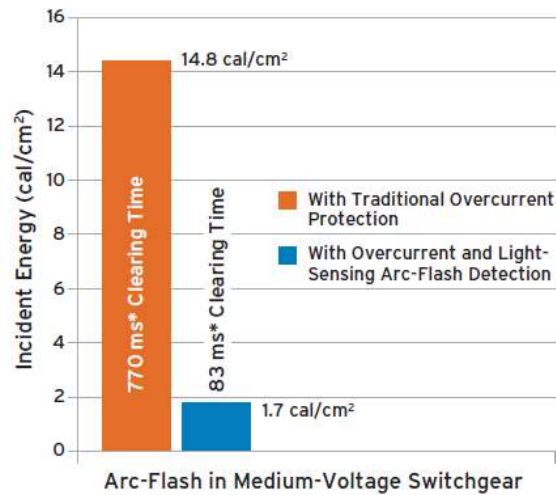


Fig. 23. Comparación de liberación de energía incidente de protección de sobre corriente y protección con algoritmo TOL [15]

Como se observa en la Fig. 23, con la protección contra Arco Eléctrico utilizando el algoritmo TOL, se reduce drásticamente la magnitud de energía incidente que se libera en un evento de falla por arco eléctrico.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente

Ventajas	Desventajas	Tiempo de Disparo
Disparo ultra rápido Seguridad por Sobre corriente y luz Se mantiene la coordinación Monitoreo continuo	Se requiere instalación de sensores Requiere pruebas adicionales	Llega a ser de 2 ms + tiempo de operación de interruptor

8 APLICACIÓN DE METODO DE CALCULO DE ARCO ELÉCTRICO

Para evidenciar las mejoras en reducción de energía incidente al utilizar el esquema con el equipo SEL, se aplica el método para el cálculo de arco eléctrico basado en la IEEE-1584, en un sistema real.

Se toma como base la Planta Termoelectrica CCM-H de la empresa Cuauhtémoc Moctezuma, para realizar los estudios de Arco Eléctrico, coordinación y protección con tecnología SEL.

Diagrama Unifilar

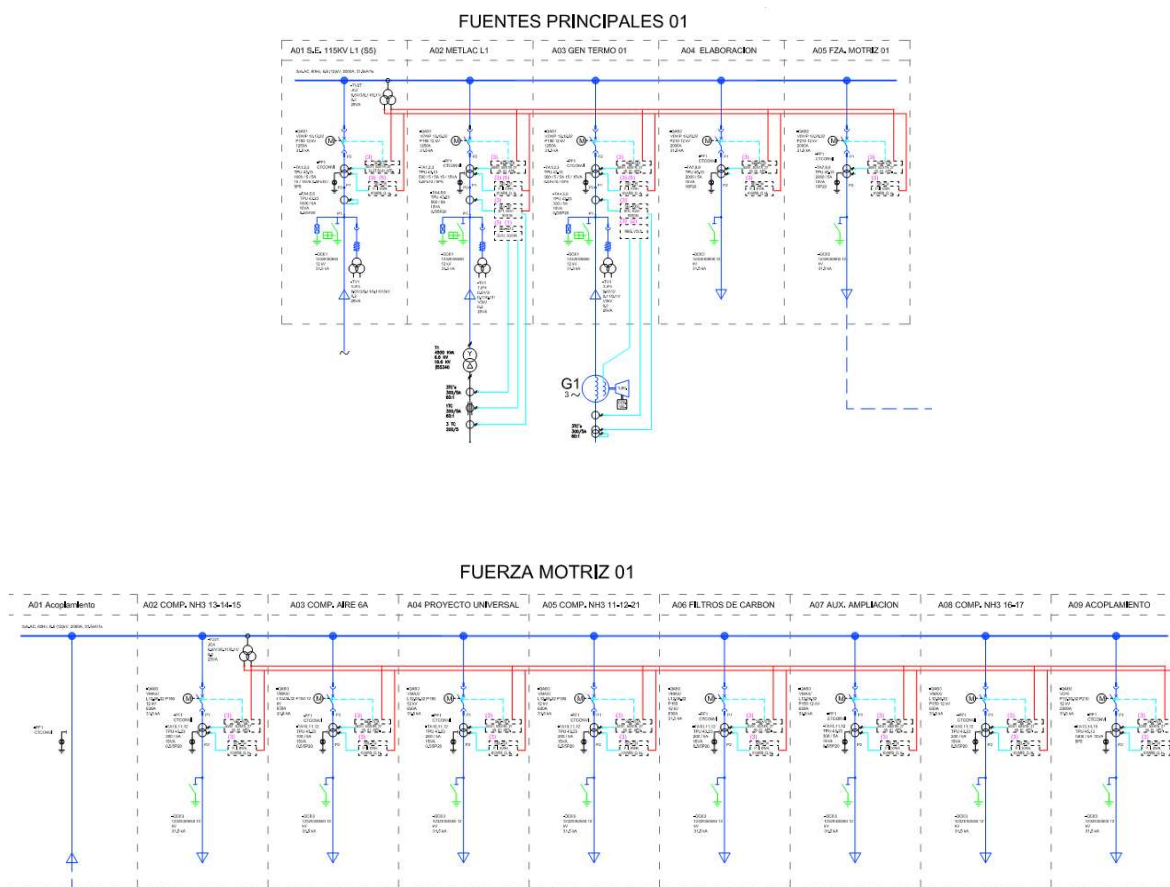


Fig.23 Diagrama unifilar planta CCM-H

8.1 Obtener datos del sistema

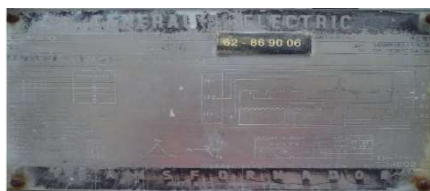
Se recopilan los datos del sistema a proteger para poder obtener el cálculo de corto circuito.

Generador:



GENERADOR	
2,000	KW
2,500	KVA
6,600	V
0.8	Pf
210	A
60	Hz

Transformador



TRANSFORMADOR	
4500	KVA
16,600	V(H)
6,600	V(L)
60	Hz

8.2 Datos para obtener corriente de corto circuito

Para obtener la corriente de corto circuito, se simula el sistema. En este caso se utiliza el software ETAP 18

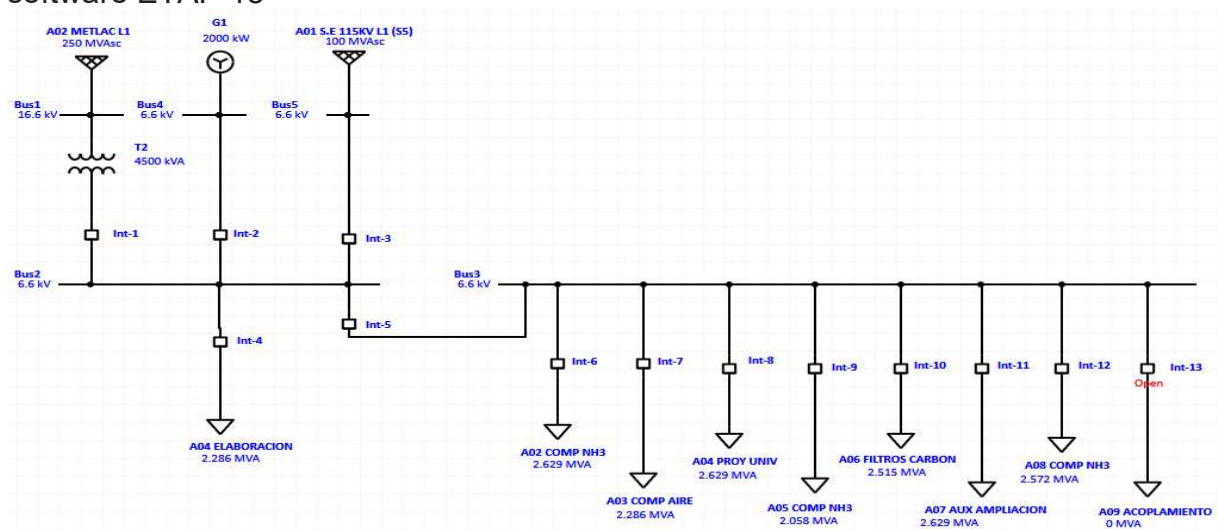


Fig.24 Modelado de sistema en software ETAP 18

ETAP es la herramienta más completa de análisis y control para el diseño, simulación y operación de sistemas de potencia eléctricos de generación, distribución e industriales.

ETAP ofrece una serie de programas totalmente integrados incluyendo flujo de carga, cortocircuito, coordinación y selectividad de protecciones, dimensionado de cables, estabilidad transitoria, arco eléctrico, flujo de potencia óptimo y más. Su diseño modular permite que sea configurado de acuerdo con las necesidades de cualquier empresa, desde sistemas de potencia pequeños, a los más grandes [14].

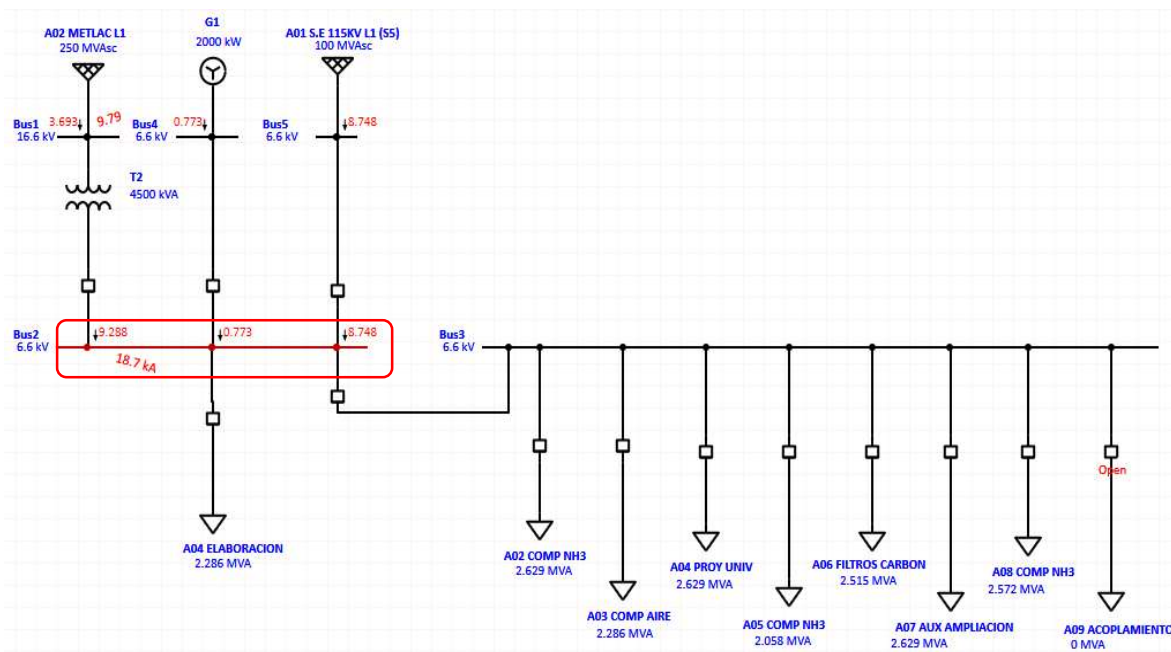


Fig.25 Corriente de corto circuito

		DigSILENT PowerFactory 15.1.2		Project: Date: 4/26/2018	
Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation / Method : VDE 0102					
		3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents			
Asynchronous Motors Always Considered		Grid Identification Automatic		Short-Circuit Duration Break Time 0.10 s	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B		Conductor Temperature User Defined No		Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s	
				c-Voltage Factor User Defined No	
Grid: Grid		System Stage: Grid			Annex: / 1
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	Tk" [kA/kA]
		[deg]			[deg]
					ip [kA/kA]
					Ib [kA]
					Sb [MVA]
					Ik [kA]
					Ith [kA]
BUS 1	6.60	0.00	0.00	1.10	209.57 MVA
T1					99.81 MVA
BUS 3					0.00 MVA
Breaker/Switch					13.97 MVA
A03 GEN TERMO 0					95.83 MVA
A01 S.E. 115KV					8.73 kA
					8.38 kA
					89.73
					90.00
					0.00 kA
					-86.00
					3.13 kA
					23.71 kA
					51.54 kA
					24.69 kA
					18.02
					205.98
					17.67
					0.96

Fig.26 Reporte de corriente de corto circuito

Gracias al software ETAP 18 se puede obtener el valor de corto circuito en la parte del sistema que se quiere proteger contra una falla de arco, quedando el valor en:

$$I_{cc} = 18.33 \text{ KA}$$

8.3 Obtener corriente de arco eléctrico

Para calcular la corriente de corto circuito de Arco se utiliza en la ecuación de la IEEE 1584-2002 descrita previamente. Debido a que el sistema es de una tensión nominal de 6.6 KV, se debe utilizar la fórmula para sistemas mayores a 1KV y menores de 15KV:

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

$$I_a = 10^{\log I_a}$$

Donde

I_a = Corriente de Arco en kA

I_{bf} = Corriente de Cortocircuito obtenida en el paso 8.2 = 18.33 KA

De la Tabla 3, se toma el valor $G = 153\text{mm}$, como la distancia entre los conductores. Eso aplica solo en caso de no contar con el dato del sistema

$V = 6.6 \text{ KV}$

Paso 1	$0.00402 + 0.983\log(I_{bf})$	1.245708703	
Corriente de Arco	$10^{\log(I_a)}$	17.608	KA

8.4 Obtener energía incidente

Energía Incidente (cal/cm²): Es la cantidad de energía impresa en una superficie a cierta distancia de la fuente. Se utiliza la formula normalizada para una distancia de trabajo de 24" y un tiempo de arco de 0.2 s., Posteriormente se normaliza con los tiempos de operación del equipo de protección e interruptor.

$$\log Ein = k1 + k2 + [1.081 \times (\log Ia)] + 0.0011G$$

$$Ein = 10 \log Ein$$

Donde

E_{in} = Energía incidente

$k1$ = -0.792 para arcos al aire libre y -0.555 para arcos dentro de una caja

$K2$ = 0 para sistemas no aterrizados o con gran resistencia de aterrizamiento y -0.113 para sistemas aterrizados

G = 153 mm (ver tabla 3).

Ia = 17.608 KA

Paso 1	$1.0811 \times \log(Ia)$	1.346735679	
Paso 2	$0.0011 \times G$	0.1683	
Paso 3	Sumar K1	-0.555	
Paso 4	Sumar K2	-0.113	
Paso 5	$S1 + S2 + S3 + S4$	0.847035679	
Total	$10\log(Ein)$	7.031	cal/cm²

8.5 Ajustar energía incidente

Ajustar la energía incidente a una distancia de trabajo específica y tiempo de libranza específico.

Los equipos de bajo voltaje para distribución requieren una distancia de trabajo de 18", El equipo de alimentación en bajo voltaje, como un tablero de media tensión requiere 24" y los equipos de media tensión requieren una distancia de trabajo de 36".

Para normalizar la energía incidente, utilizaremos la ecuación:

$$Ei = 4.184 \times Cf \times Ein [(t/0.2) \times (610/Dw)^x]$$

Donde

Ei = Energía incidente específica

Cf = Factor de cálculo (1 para voltajes mayores a 1KV y 1.5 para voltajes debajo de 1KV)

t = Tiempo de arco (seg)

Dw = Distancia de trabajo = 610 mm

Ein = Energía incidente normalizada a 0.2 seg y 24 in

X = Factor de distancia (ver Tabla 3)

Clase de Equipo	Distancia de Trabajo Típica en mm
Tablero de media tensión 15 KV	910
Tablero de media tensión 5 KV	910
Tablero de baja tensión	610
CCM y Tableros de servicios	455
Cable	455
Otros	Determinar en sitio

Tabla 7. Distancias de trabajo requeridas [4]

Tipo y Rango de interruptor	Tiempo de operación en 60 HZ (ciclos)	Tiempo de operación en segundos
Bajo voltaje (caja moldeada) (<1000V)	1.5	0.025
Bajo voltaje (caja moldeada) (<1000V) interruptor de potencia (disparo integral u operado por relé)	3.0	0.050
Media tensión (1-35KV)	5.0	0.080
Alta tensión (>35KV)	8.0	0.130

Tabla 8. Tiempos típicos de operación de interruptores.[4]

La tabla 5, indica solamente el tiempo de operación del interruptor, por lo que el tiempo de operación del relevador de protección debe ser agregado a este tiempo.

El tiempo de detección de arco eléctrico con los equipos SEL es de 2ms, por lo que el tiempo de arco se debe de ajustar:

$$t = 0.002 + 0.080 = 0.082 \text{ seg}$$

Paso 1	$(610/Dw)^x$	0.677608203	
Paso 2	$t/0.2$	0.41	
Paso 3	$Cf \times Ein$	7.031	
Paso 4	$S1 \times S2 \times S3$	1.953	cal/cm2
Paso 5	$Paso 4 \times 4.184$	8.173	J/cm2

8.6 Límite de arco

Límite de Arco Eléctrico: Límite de Distancia en que se puede estar expuesto a una quemadura de 2do grado en caso de que ocurra un arco eléctrico.

$$DB = [4.184 \times Cf \times Ein \times (t / 0.2) \times (610^x / EB)]^{1/x}$$

Donde

DB = Distancia del arco en mm

EB = Energía Incidente a los límites del arco, típicamente 1.2 cal/cm² ó 5 Joule/cm²

Ein = Energía Incidente normalizada, de hoja de cálculo A

Cf = Factor de Calculación

t = Tiempo de duración del arco de acuerdo con curva de operación de la protección de sobre corriente

X = Distancia de exposición de acuerdo con Tabla 3

Conversiones: 1 Inch = 25.4 milímetros 0.24 cal / cm² = 1 Joule/cm²

Paso 1	Dn^x / EB	102.602	
Paso 2	$t/0.2$	0.41	
Paso 3	$4.184 \times Cf \times Ein$	29.41896264	
Paso 4	$S1 \times S2 \times S3$	1,237.562	
DB (mm)	$S4^{(1/x)}$	1,507.938	mm
DB (in)	$DBin/25.4$	59.368	In

9 GUÍA DE DISEÑO DE PROTECCIÓN CONTRA ARCO ELÉCTRICO

Como se mencionó anteriormente, el esquema de protección por sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente es el método que proporciona una operación más rápida para la protección contra arco eléctrico, el cual funciona mezclando la detección de luz y de sobre corriente simultáneamente para proceder a realizar un disparo al interruptor asociado a la falla logrando así una reducción muy significativa en el tiempo de operación y por lo tanto en la magnitud de energía incidente que es liberada por esta falla.

Es por ello por lo que esta guía de diseño para protección contra arco eléctrico se enfocara en el diseño de esta metodología de protección.

9.1 Sensores ópticos

Cada sensor está conectado a la tarjeta de entradas de arco eléctrico en un extremo y enrutado a través del equipo a proteger contra detección de arco eléctrico. Cada sensor de arco eléctrico es un lazo de fibra óptica que actúa como un lente para detectar cualquier luz emitida en el área protegida. Hay dos tipos de sensores disponibles:

- a) Sensores de punto
- b) Sensores de lazo de fibra desnuda.

Los sensores de punto son cable de fibra óptica revestido terminando en una pequeña lente colectora. Este tipo de sensor está diseñado principalmente para detectar luz en un área específica.

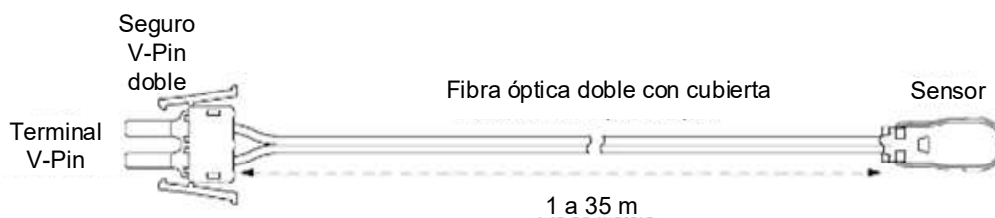


Fig.27. Ensamble de sensor puntual [8]

Los sensores de lazo de fibra desnuda son longitudes de cables de fibra óptica sin cubierta colocados en forma de lazo a través del área de detección. Los sensores de lazo de fibra desnuda están destinados principalmente a detectar la luz sobre un área más grande y menos específica que los sensores puntuales. Ambos tipos de sensores son muy sensibles a la luz y están hechos de un material óptico resistente y flexible.

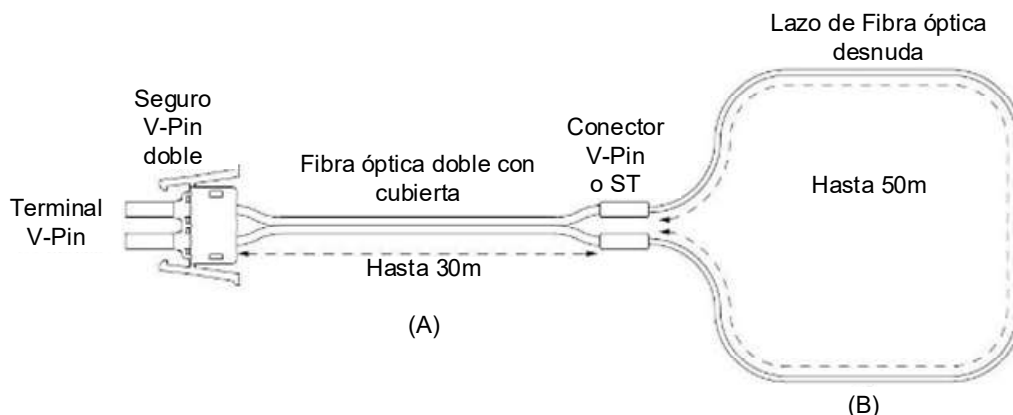


Fig.28. Ensamble de sensor de lazo [8]

El ensamble del sensor de lazo de fibra desnuda es similar al del sensor puntual. La longitud total de la fibra con cubierta (A) en este ensamble es de 30m (98.4 ft), y la longitud máxima de fibra desnuda (B) es de 50m (164 ft). La longitud máxima total del ensamble ($A + B + A$) no debe ser mayor de 70m (229.6 ft). La razón para combinar fibra con cubierta y fibra desnuda es que la fibra con cubierta proporciona aislamiento entre la zona de detección de fibra desnuda y la entrada de arco eléctrico en el relé [8].

Una cosa importante para tener en cuenta al elegir la longitud de la fibra es que cuanto más largo sea el lazo de fibra desnuda, más débil es el acoplamiento entre la luz externa y la fibra. Esto significa que, si dos los sensores de lazo de fibra desnuda experimentan la misma cantidad de luz externa, la lectura de luz en el relé con el sensor de longitud mayor será menor que la lectura del relé con el sensor de menor longitud.

Al realizar el diseño de la instalación de los sensores de fibra óptica, es muy importante considerar las longitudes máximas que estos pueden tener. Esto se realiza en base a las pérdidas que tiene la fibra desde el punto de detección hasta la entrada en el relé.

Para poder realizar el cálculo de pérdidas, se debe considerara todos los elementos que componen el sensor, y las pérdidas que añaden cada uno, esto se realiza en base a la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla de datos de Perdidas. [8]

Elemento	Perdida
Conector ST	2 dB
Conector V-Pin	2 dB
Fibra con cubierta	0.175 dB/m
Fibra desnuda	0.175 dB/m

La suma de todas las pérdidas de cada sensor no debe ser mayor a:

- a) Sensores de punto 12.25 dB
- b) Sensores de lazo de fibra desnuda. 17 dB

Es importante indicar que las pérdidas de los sensores deben calcularse en cada instalación, ya que, cada arreglo de sistema es diferente, y, por lo tanto, la configuración de cada sensor puede diferir de los arreglos mostrados en este trabajo dependiendo de cómo serán instalados y las rutas que recorrerán (pudiendo tener más conexiones V-Pin o ST).

Existen recomendaciones para el ruteo e instalación de los sensores AFD, estas deben ser ubicaciones donde exista mayor posibilidad de que ocurra un incidente y/o donde los trabajadores tengan más contacto con el sistema.

Las ubicaciones de riesgo son las secciones de la línea entrante donde la transición es de cable a barra, interruptor puntos de apuñalamiento y transiciones de sección de bus. Muchas veces, estas transiciones se separan en distintos compartimientos dentro del tablero. Este aislamiento reduce por si solo el daño durante una falla al aislar la falla en un área y proporciona la ventaja adicional de poder usar la luz para detectar en qué área está la falla. Debido a que el relé SEL-751 tiene cuatro entradas separadas para la detección de arco eléctrico, cada entrada se puede utilizar para disparar una sección separada del interruptor, aislando rápidamente el área fallada y minimizando las secciones afectadas.

Una instalación típica incluye sensores puntuales en el compartimiento del interruptor principal y un sensor de lazo de fibra desnuda a lo largo del compartimiento de bus y sensores puntuales en los compartimientos de los interruptores de los alimentadores. se pueden instalar sensores puntuales en el compartimiento del interruptor y el compartimiento de conexión de salida.

En el caso de un evento de arco eléctrico censado por el AFD instalado en el compartimiento de salida dispararía el interruptor del alimentador asociado a dicho compartimiento de salida solamente, ya que, aunque el relevador asociado al interruptor principal mida la sobre corriente, no tiene la confirmación por luz de que tiene que disparar, por lo que de esta manera se agrega selectividad a la protección

Se recomienda instalar los sensores:

- En la parte posterior de los compartimientos
- Lejos de los equipos y conductores
- No estén cerca de orillas filosas que puedan dañar la fibra óptica
- No estar obstruidos por otros equipos

En las Fig. 29 y Fig.30 se muestran en las vistas frontal y posterior de los gabinetes, las ubicaciones recomendadas para la instalación de los sensores AFD.

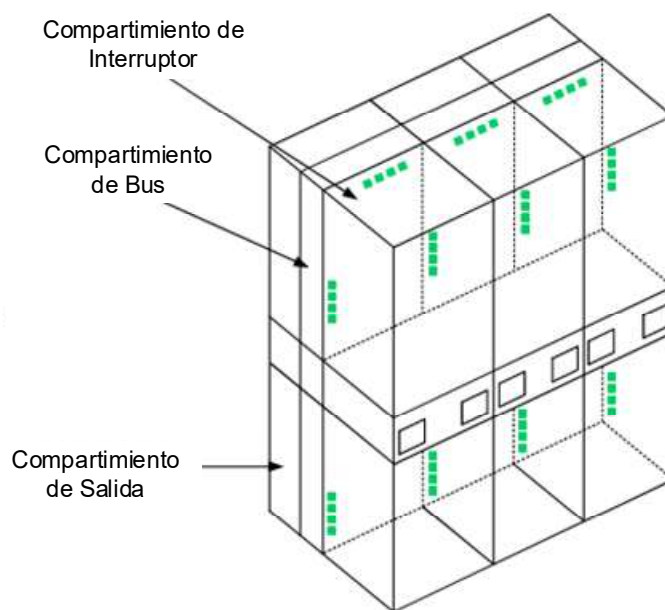


Fig. 29. Vista frontal Tablero de Media Tensión [8].

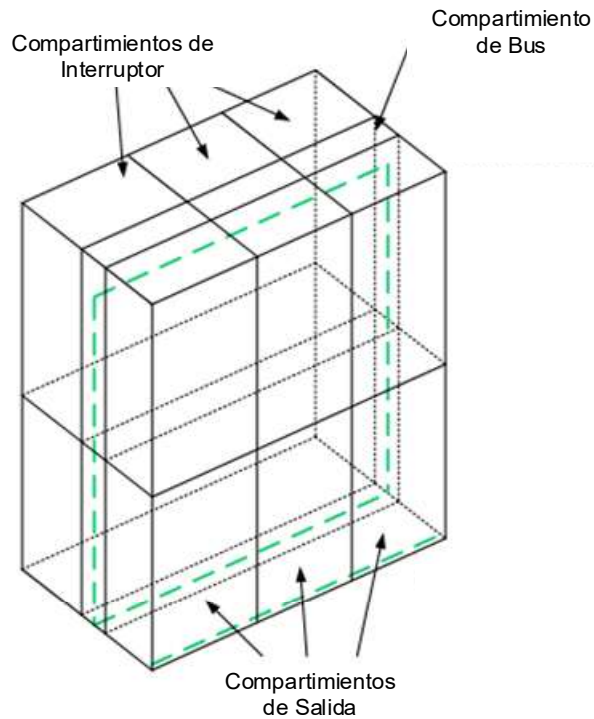


Fig. 30. Vista posterior Tablero de Media Tensión [8].

En la Fig.31 se muestra un ejemplo real de la instalación de los sensores AFD en un tablero de 34.5KV del cliente Brazos Electric en Texas, USA.

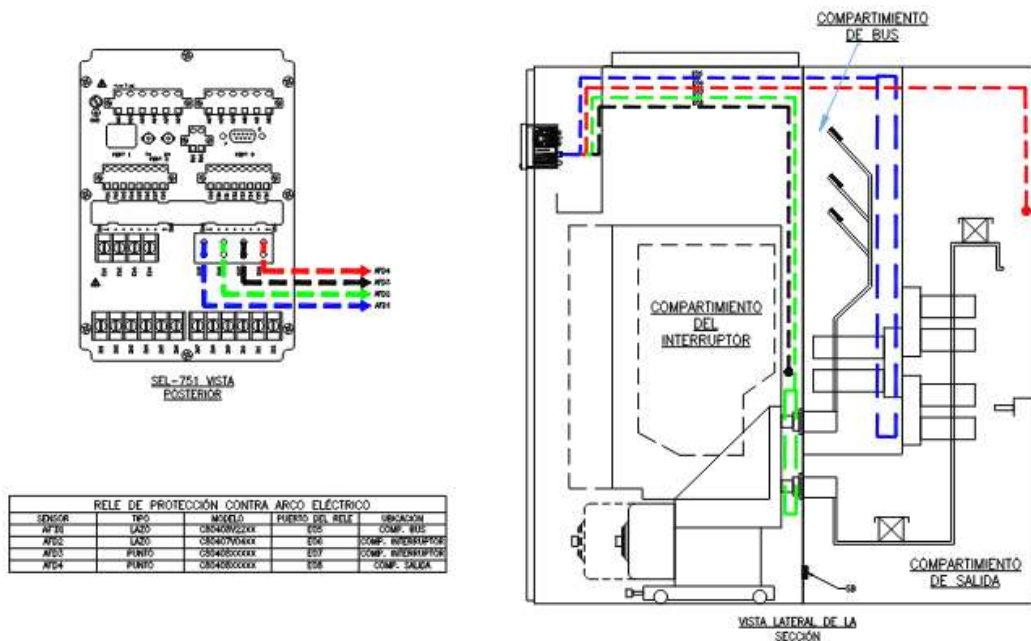


Fig. 31. Ejemplo de instalación de sensores AFD

9.2 Configuraciones del sistema

Como se mencionó anteriormente, deben existir corriente de falla y presencia de luz, para determinar si el evento es un arco eléctrico, idealmente es un solo relevador el que obtenga ambas señales analógicas a través de su entrada de corriente y sensor AFD. Pero debido a la ubicación de los transformadores de corriente (TC's) y/o configuración de los equipos a proteger, puede que esto no ocurra y que se reciban las señales de disparo a través de otro relevador, por lo que la selección de los sensores, su ubicación y configuración de comunicaciones entre los relevadores es muy importante, ya que, cada comunicación entre equipos, dependiendo el medio, la distancia, entre otros factores, añade tiempo, y, como se mostró en este trabajo, la cantidad de energía incidente liberada en un evento de arco eléctrico puede aumentar de manera importante con cada milisegundo que se tarde en operar las protecciones.

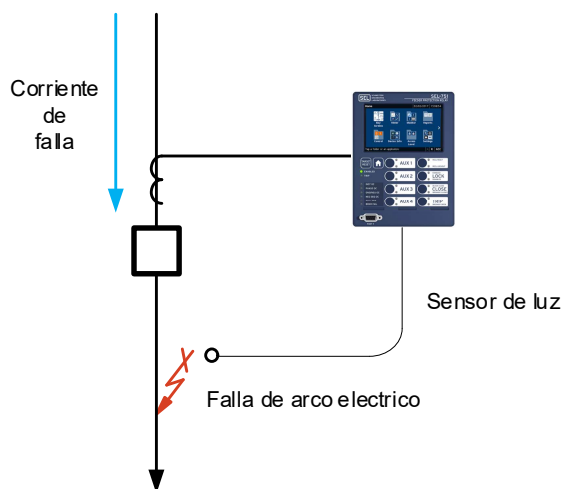


Fig. 32. Esquema de Sensor de luz de alta velocidad más sobre corriente

Para lograr esto, se debe tener claro, que relevador debe operar de acuerdo con la falla de arco eléctrico en las diferentes partes del sistema, para poder establecer correctamente las comunicaciones, permisos y bloqueos de disparo.

En un sistema de una barra sencilla con una acometida principal y alimentadores, se debe considerar un arreglo como el mostrado en la Fig.33

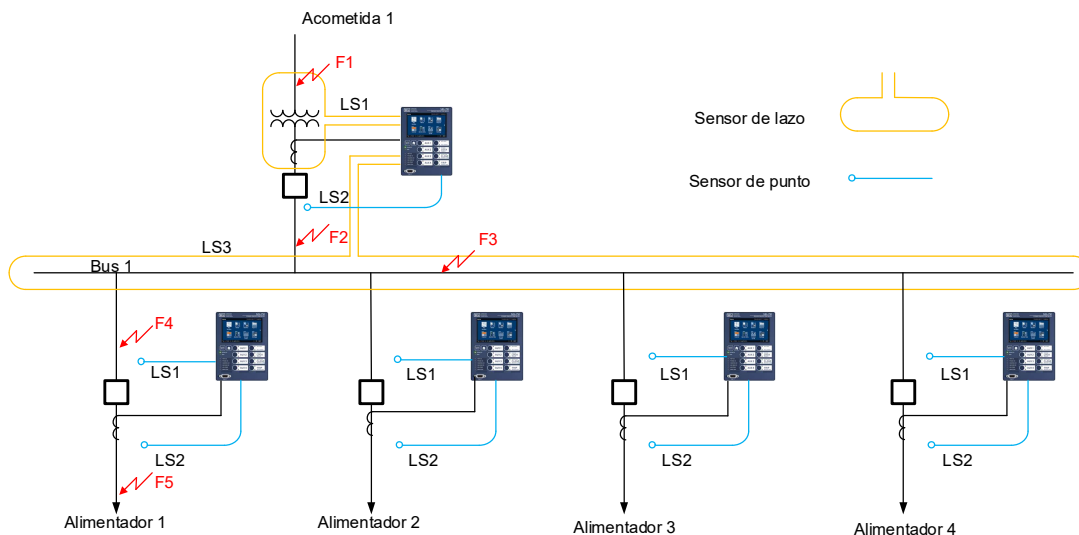


Fig. 33. Esquema barra sencilla con una acometida y alimentadores y TC's de lado carga del interruptor de alimentadores

Como se muestra en la Fig.33 el caso más común es tener los TC's de los alimentadores, del lado carga. Pero también es posible tener los TC's del lado fuente de los interruptores de alimentadores, como se muestra en la Fig.34:

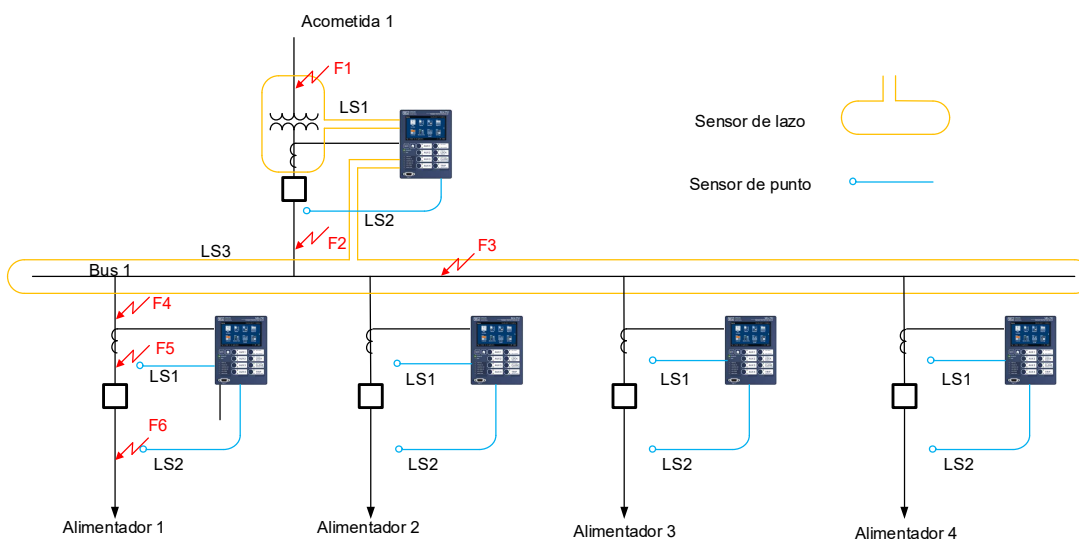


Fig. 34. Esquema barra sencilla con una acometida y alimentadores y TC's de lado fuente del interruptor de alimentadores

Para ambos casos, las zonas de protección quedan como se muestra en la Tabla 10:

Relevador	Entrada de Sensor y tipo	Zona de Protección
Acometida 1	LS1 - Lazo	Compartimiento de entrada y transformador
	LS2 - Punto	Compartimiento del Interruptor
	LS3 - Lazo	Bus
Alimentador 1	LS1 - Punto	Compartimiento del interruptor
	LS2 - Punto	Compartimiento de salida
Alimentador 2	LS1 - Punto	Compartimiento del interruptor
	LS2 - Punto	Compartimiento de salida
Alimentador 3	LS1 - Punto	Compartimiento del interruptor
	LS2 - Punto	Compartimiento de salida
Alimentador 4	LS1 - Punto	Compartimiento del interruptor
	LS2 - Punto	Compartimiento de salida

Tabla 10. Zonas de Protección esquema de barra sencilla.

Las lógicas de operación para estos esquemas son como sigue:

Para Falla F1

Esta falla se localiza en el compartimiento de del transformador en el lado fuente del sistema y es cubierta por el relevador asociado a la Acometida 1, es captada por el sensor LS1. Este sensor es tipo lazo para poder cubrir todo el equipo a proteger, ya que por las dimensiones es posible que un sensor de punto no tenga la cobertura suficiente y pueda, o no captar el destello o tomar más tiempo para que el sensor se active debido a obstáculos materiales entre el punto de falla y el sensor.

En este caso la lógica de operación será asociada a LS1 y lectura de sobre corriente de falla y el relevador deberá abrir el interruptor de la acometida (en caso de que se tenga

otra fuente asociada a Bus 1) y mandar abrir el interruptor colateral de la línea de alimentación.

Para Falla F2

Esta falla se localiza en el compartimiento de salida en el lado carga de interruptor principal y es cubierta por el relevador asociado a la Acometida 1, es captada por el sensor LS2. Este sensor es de punto, ya que supervisa solamente la conexión mecánica entre la salida de la acometida y el Bus 1, la cual es un área pequeña que es cubierta completamente por este tipo de sensor.

En este caso la lógica de operación será asociada a LS2 y lectura de sobre corriente de falla y el relevador (ya que la aportación de corriente sigue pasando por el TC) y deberá abrir el interruptor de la acometida. En este caso no es necesario mandar abrir el interruptor colateral de la línea de alimentación, ya que, abriendo el interruptor de la acometida, cortara la aportación a la falla.

Para Falla F3

Esta falla se localiza en el compartimiento de Bus 1 y es cubierta por el relevador asociado a la Acometida 1, es captada por el sensor LS3. Este sensor es de lazo, ya que supervisa la totalidad del Bus 1, la cual es un área extensa que es cubierta completamente por este tipo de sensor (siempre que su longitud no exceda las pérdidas máximas en la fibra óptica permitidas por el fabricante).

En este caso la lógica de operación será asociada a LS3 y lectura de sobre corriente de falla y el relevador (ya que la aportación de corriente sigue pasando por el TC) y deberá abrir el interruptor de la acometida. En este caso no es necesario mandar abrir el interruptor colateral de la línea de alimentación, ya que, abriendo el interruptor de la acometida, cortara la aportación a la falla.

Para las fallas F4 y F5 se debe operar de acuerdo con la Fig.35

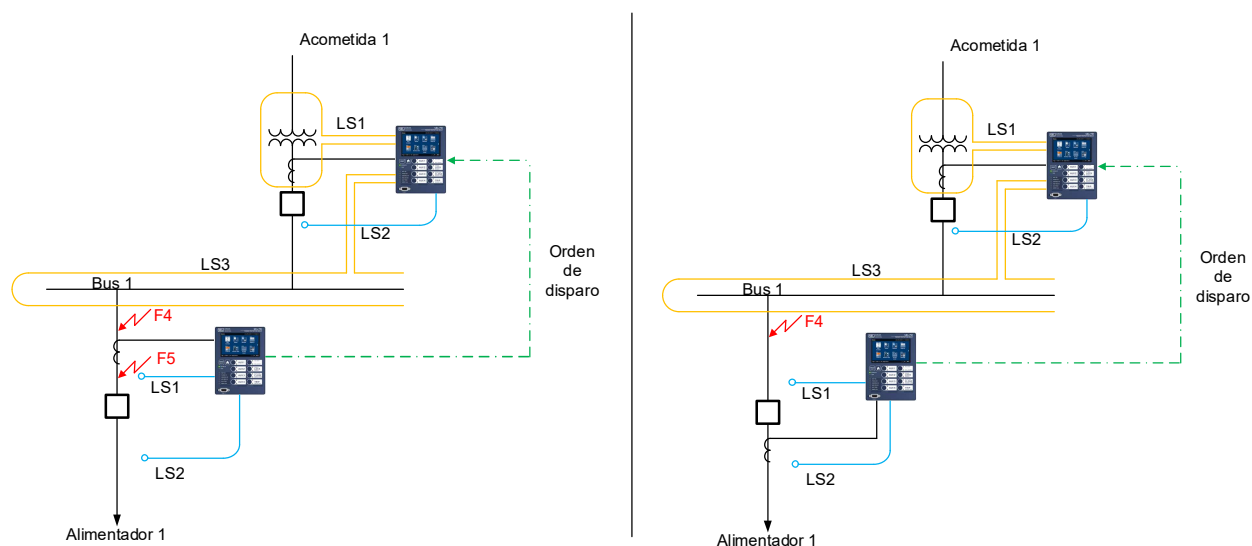


Fig. 35. Orden de Disparo a interruptor de acometida

Para Falla F4

Esta falla se presenta en el compartimiento de entrada de la sección de alimentador, por lo que no puede ser captada por el sensor LS3 del relevador de la Acometida 1 asociado al interruptor principal del sistema.

En este caso, como la falla esta en la sección de alimentador, pero antes de los TC's, estos no podrán censar la sobre corriente, así que solo captarán la falla por el sensor LS1 del relevador de Alimentador. Este sensor es de tipo punto, ya que, supervisa la conexión mecánica entre el Bus 1 y la sección de alimentador, como es un área pequeña, es cubierta perfectamente por este tipo de sensor.

Esta falla se considera como si sucediera en el Bus 1, por lo que el interruptor que debe liberar la falla es el interruptor de la acometida, pero como el interruptor asociado a la acometida solo ve sobre corriente, no la considera como falla de arco eléctrico, por lo que su operación será el tiempo de coordinación de protecciones.

Por ello es necesario que el relevador de alimentador, al censar luz en LS1, mande la señal de disparo al interruptor de la acometida. Este comando puede ser a través de un contacto de salida rápida (High speed output contact) o a través de protocolos de comunicaciones. En ambos casos, se debe medir el tiempo de operación desde que el relevador asociado al alimentador opera, manda la señal al interruptor de acometida y este opera, en el cálculo de corriente de arco, para definir la magnitud de energía incidente que será liberada en este tipo de falla para poder hacer las recomendaciones pertinentes para mitigación de falla por arco eléctrico, así como la selección del EPP necesario.

Para Falla F5

En el caso de tener los TC's en el lado fuente del interruptor de Alimentador, y tener una falla en el compartimiento del interruptor de alimentador. En este caso, la operación es la misma que para la falla F4, la única diferencia es que, el relevador del alimentador vera sobre corriente y luz, pero al estar asociada la protección del compartimiento de entrada a LS1, esta será la forma de discriminar que la falla es del lado fuente de la sección del alimentador, por lo que es el interruptor de la acometida el responsable de liberar esta falla.

Igualmente, se debe considerar el tiempo de comunicación entre los relevadores para el cálculo de la energía incidente liberada por esta falla para mitigación de falla por arco eléctrico, así como la selección del EPP necesario.

Para Falla F6

Esta falla está presente en el compartimiento de salida de la sección de Alimentador y es supervisada por el sensor LS2, el cual es un sensor tipo punto y supervisa la conexión mecánica entre las barras de cobre y cables de salida, la cual es un área pequeña que es cubierta perfectamente por este tipo de sensor.

Para esta falla, el relevador de Alimentador vera la sobre corriente y también el destello del arco eléctrico en LS2, esta es la forma para saber que la falla esta debajo del interruptor de alimentador, por lo cual es este el encargado de aislar la falla.

La diferencia entre F5 y F6 es poder discriminar cuando la falla esta de lado fuente o lado carga del interruptor de alimentado, ya que, en ambos casos, el relevador medirá la sobre corriente, por lo que es muy importante poder discriminar en donde se encuentra la falla, lo cual se hace identificando que sensor es el que midió el destello.

9.3 Consideraciones para pruebas en campo

Para poder realizar las pruebas en campo, se debe contar con un equipo de prueba que pueda generar un destello de la magnitud requerida por el sistema, en base a sus condiciones características y generar los valores de sobre corriente que medirá el relevador. Este flujo de operación se muestra en la Fig.36:

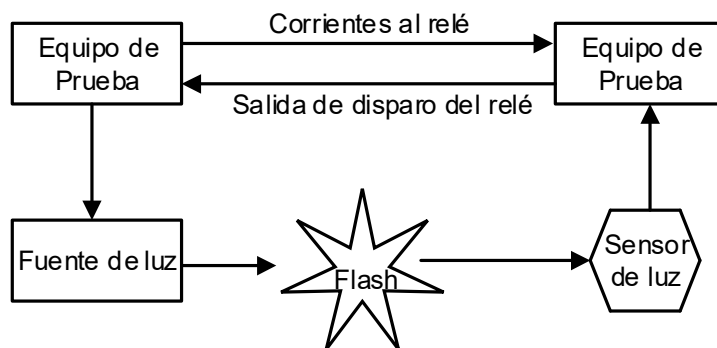


Fig. 36. Diagrama de bloques de sistema de prueba [18]

Calibrar la fuente de luz

Para las pruebas de arco eléctrico, se debe calibrar la fuente de luz con la fuente de corriente para que el relevador pueda sensor correctamente ambas señales, por lo que el equipo de pruebas que se utilice debe ser capaz de producir estados de pre-falla, emisión de luz, estado de falla y estado de post-falla. Para poder realizar la prueba se debe coordinar la emisión de luz con el tiempo de falla [18].

En la Fig. 37 se muestra un ejemplo de operación simultanea de la emisión de luz y corriente de estado de falla, en la que se observa que, aunque se emiten simultáneamente, existe un desfase en tiempo para que el relé mida ambas señales.

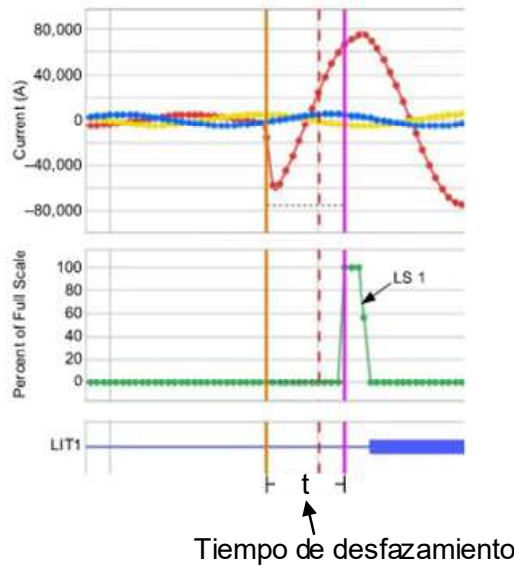


Fig. 37. Operación de emisión de luz y estado de falla simultaneas [18]

Para lograr que el relevador reciba ambas señales simultáneamente, se debe corregir el desfazamiento en tiempo entre ellas, por lo que, en el equipo de pruebas se debe de adelantar la emisión de luz el tiempo “t”. Para que la prueba sea exacta, a este tiempo “t” se le debe restar 1.5ms, ya que, como se mencionó anteriormente en este trabajo, en pruebas realizadas en laboratorio, se identificó, que la corriente adelanta a la luz en aproximadamente 1.5ms.

En la Fig.38, se muestra la emisión de luz adelantada el tiempo “t” de la Fig.37, logrando que el relevador pueda sensor ambas señales simultáneamente y poder identificar el evento como un arco eléctrico.

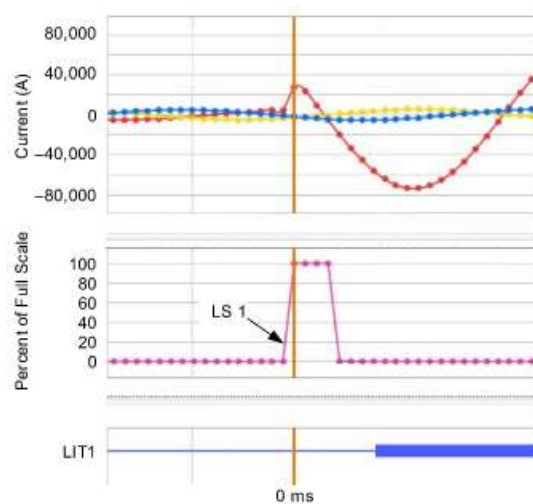


Fig. 38. Operación de emisión de luz adelantada tiempo “t” a estado de falla [18]

Cuando se realizan las pruebas de puesta a punto en el sistema, se debe confirmar lo siguiente [18]:

- a) EL punto de pickup de los sensores de luz (AFD) está por encima del nivel de luz ambiental en la zona de arco eléctrico a proteger.
- b) Confirmar que las pérdidas en la fibra óptica no exceden los límites especificados por el fabricante.
- c) La zona de protección de arco eléctrico es la correcta y no existe sobre alcance zonas.
- d) Los tiempos de operación son de acuerdo a lo diseñado, limitando los niveles de energía incidente a lo establecido en el diseño.

10 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado los riesgos y peligros de la exposición a una falla de arco eléctrico y la importancia de contar con la preparación tanto en conocimientos como con los equipos de protección adecuados para poder proteger la integridad física de los trabajadores que laboraran dentro de los límites de riesgo, así como también proteger a los equipos del sistema para evitar su exposición a esta falla durante tiempos prolongados que puedan dañar de forma irreparable a los equipos.

Como se explicó, actualmente existen normas que han profundizado en este estudio y han elaborado metodologías para poder calcular los niveles de energía incidente que es liberada en los puntos deseados del sistema, para poder tomar medidas de mitigación de esta falla y así poder realizar los diseños en los esquemas de protecciones particulares para minimizar el daño producido, y lo mas importante, proteger la vida de las personas.

En este trabajo se proveen las consideraciones que se deben de tener al momento de desarrollar el diseño de protección contra arco eléctrico para poder obtener el mayor beneficio y utilizando el algoritmo TOL (Time Over Light) que SEL ha desarrollado y lo ha incluido en algunos de sus equipos, como son SEL-751, SEL-710, SEL-849, el cual permite poder acelerar el tiempo de operación de la protección en base a sus elementos de sobre corriente 50PAF y 50NAF, los cuales necesitan solo 2ms para poder identificar que es una corriente de falla y al ser supervisada por luz, agrega seguridad al esquema. Y la importancia realizar todos los cálculos necesarios, para todas las posibles combinaciones y/o configuraciones de los sistemas a proteger para poder obtener el tiempo de libranza, considerando tiempos de operación del algoritmo de protección, tiempos de operación de contactos de salida, tiempos de comunicaciones entre relevadores (dependiendo la ubicación de la falla) y tiempos de operación de los interruptores, para poder reducir hasta en un 80% los niveles de energía incidente liberada.

11 REFERENCIAS

[1] “Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo” Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS-2008, Diario Oficial de la Federación, 9 de diciembre de 2008

[2] Lee, R (1982) The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burn, IEEE Trans. On Industry Applications, IA18(3), 246-351

[3] Johnson, D, Arc Flash Statistics, ISHN, 31 de Mayo de 2013, <https://www.ishn.com/articles/96001-arc-flash-statistics>

[4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Guide for Ar Flash Calculations, IEEE Stdard 1584-2002. (2002). New York, NY:

[5] Occupational Safety and Health Administration. (1970). Occupational safety and health standards: Electric Power Generation, Transmission, and Distribution (Standard No. 1910.269).

[6] Earley, M. W., Sargent, J. S., Coache, C. D., & Roux, R. J. (2011). National electrical code handbook. Quincy, Mass: National Fire Protection Association.

[7] National Fire Protection Association. Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces, NFPA 70E. (2004) Quincy, MA:

[8] Zeller, M., Hargrave, A & Haas, D. (2016) Using the SEL-751 and SEL-751A for Arc-Flash Detection, Aplication Guide, AG2011-01

[9] Kirby, R. (2007) Reducing Arc-Flash Hazard Energy During Maintenance With an SEL-351S Front-Panel Pushbutton, Aplication Guide, AG2007-08

[10] Schweitzer Engineering Laboratories. SEL-751 Feeder Protection Manual. 2020-09-21

[11] Nella, L. (2009) Faster Detection Adds Safety, Occupational Health & Safety. <https://ohsonline.com/Articles/2009/12/01/Faster-Detection-Aids-Safety.aspx>

[12] Rodriguez, E.,(2018), Estudio de Arco Eléctrico en la subestación Donato (Tunja) para la Empresa de Energía de Boyacá S.A.E.S.P, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Duitama, Escuela de Ingeniería Electromecánica Duitama, Boyacá

[13] Phillips, J. , How to Perform and Arc-Flash Study Parts 1, 2 and 3, Technical Training Group, www.brainfiller.com

[14] SILVATECH S.A. Software ETAP [En línea] <http://www.silvatech.com.ec/software-etap.html>

[15] Schweitzer Engineering Laboratories (2018). SEL Arc-Flash Detection (AFD) Questions and Answers, 2018-05-10

[16] Schweitzer Engineering Laboratories (2018). SEL Arc-Flash Detection Solutions, 2018-09-28

[17] Buff, J., Zimmerman, K. (2006). Application of existing technologies to reduce Arc-Flash Hazards. Western Protective Relay Conference, October 2006

[18] Cato, M, Gill, A, Manson, S & Watkins, M (2019). Techniques for Commissioning Arc-Flash Mitigation Systems. IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC). (2019)Vancouver, BC, Canada

[19]Shanghai C&G Safety Co (sf) Causes of Electric Flash. Descargado de: https://www.cgprotection.com/knowledge/p_273.html

[20] Brady (sf). Seven Elements of an Arc Flash Label. Descargado de: <https://www.bradyid.com/applications/arc-flash-labeling-requirements>