

# Implementación de la Protección por Arco Eléctrico en la Central Hidroeléctrica Malpaso

Reporte de Residencia

Ingeniería Eléctrica

Alejandro Gutiérrez Gómez

Asesor Interno:

Ing. Lisandro Jiménez López

Asesor externo:

Ing. Víctor García Kassab

Agosto - Diciembre 2016

---

---

## LISTADO DE ABREVIATURAS

<b>AFB</b>	<b>Distancia límite de arco eléctrico</b>
<b>ANSI</b>	<b>American National Standards Institute</b>
<b>CA</b>	<b>Corriente alterna</b>
<b>CB</b>	<b>Interruptor de circuito</b>
<b>CBFP</b>	<b>Protección contra falla del interruptor de circuito</b>
<b>CD</b>	<b>Corriente directa</b>
<b>DI</b>	<b>Entrada digital</b>
<b>DO</b>	<b>Salida digital</b>
<b>EFF</b>	<b>Factor de eficiencia</b>
<b>FP</b>	<b>Factor de potencia</b>
<b>I<sub>b</sub></b>	<b>Corriente base</b>
<b>I<sub>cc</sub></b>	<b>Corriente de cortocircuito</b>
<b>IEC</b>	<b>International Electrotechnical Commission</b>
<b>IEEE</b>	<b>Institute of Electrical and Electronics Engineers</b>
<b>IHM</b>	<b>Interface hombre-maquina</b>
<b>I<sub>n</sub></b>	<b>Corriente nominal</b>
<b>LCD</b>	<b>Pantalla de cristal líquido</b>
<b>LED</b>	<b>Diodo emisor de luz</b>
<b>RPM</b>	<b>Revoluciones por minuto</b>
<b>TC</b>	<b>Transformador de corriente</b>
<b>THD</b>	<b>Distorsión armónica total</b>
<b>V<sub>b</sub></b>	<b>Voltaje base</b>
<b>X'<sub>d</sub></b>	<b>Reactancia subtransitoria</b>
<b>X'<sub>d</sub></b>	<b>Reactancia transitoria</b>
<b>X<sub>d</sub></b>	<b>Reactancia síncrona</b>
<b>Z<sub>b</sub></b>	<b>Impedancia base</b>
<b>Z<sub>eq</sub></b>	<b>Impedancia equivalente</b>

# Índice

## Contenido

1. Introducción .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Estado del Arte .....	3
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos .....	5
1.5 Metodología .....	5
2. Fundamento Teórico .....	8
2.1 La Central Hidroeléctrica Malpaso .....	8
2.2 Corto circuito .....	12
2.3 El arco eléctrico.....	17
2.4 Transformadores de instrumento.....	20
2.5 Protecciones por arco eléctrico .....	23
3. Desarrollo.....	27
3.1 Estudio de cortocircuito .....	27
3.2 Análisis de arco eléctrico .....	36
3.3 Equipos a utilizar.....	40
4. Conclusiones .....	45
4.1 Resultados .....	45
4.2 Conclusiones .....	51
Referencias Bibliográficas .....	51
Anexos.....	53
Anexo A: Levantamiento de equipos en Servicios Propios .....	53
Anexo B: Calculo de arco eléctrico.....	56
Anexo C: Diagramas de la C.H Malpaso .....	58



# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

La Central Hidroeléctrica Netzahualcóyotl más conocida como “Malpaso“, es una presa que se encuentra ubicada en el cauce del Río Grijalva entre los municipios de Berriozábal, Tecpatán y Ocozocoautla de Espinosa en el Noroeste del estado de Chiapas, cuenta con 6 unidades generadoras marca ASEA de 180 MW cada una, 4 en la primera etapa y 2 en la segunda, dando un total de 1080 MW total de energía eléctrica.

Aproximadamente, ocurren 30 mil accidentes no fatales por choque eléctrico cada año. Según el National Safety Council (NSC, por sus siglas en inglés) de EUA, se estima que ocurren cerca de mil fatalidades cada año por electrocución. El arco eléctrico se presenta como la tercera causa de muerte común en la industria, aportando el 25 por ciento de las fatalidades en el sector eléctrico.

Las normas mexicanas exigen a las empresas en la industria eléctrica que deben garantizar la seguridad de sus trabajadores, por lo que la búsqueda y adquisición de equipos y herramientas para lograr ese objetivo se ha incrementado en estos últimos años, uno de los puntos de seguridad eléctrica es el arco eléctrico, el cual se encuentra presente en todos los sistemas de potencia.

Además, las modificaciones y ampliaciones que se hacen al sistema eléctrico hacen necesario cambiar los ajustes y en ocasiones los equipos de protección, es recomendable para cualquier industria el hacer revisiones de los valores de cortocircuito y de los equipos de protección cada 5 años como mínimo o cada vez que exista un cambio en potencia, en la carga de la central y en los dispositivos de protección.

El esquema de servicios propios de la central compuesto por los gabinetes de alojamiento de interruptores servicios propios, CCM y transformador auxiliar no cuentan con un elemento de detección de arco eléctrico que garantice la integridad física del personal que labora con los equipos y que pueda provocar daños humanos y materiales irreparables. Por lo cual no satisface las necesidades de protección de la empresa.

## 1.2 Estado del Arte

Implementación del primer sistema de detección y mitigación de arco eléctrico (SDMAE) a nivel nacional en centrales generadoras de la C.F.E, donde se llevó a cabo la instalación y puesta en servicio del SDMAE en los sistemas auxiliares de la U-4 de la central térmica Puerto Libertad. La normatividad contemplada para el estudio fue la *Standard for electrical Safety in the Workplace* NFPA 70E, y los equipos instalados contemplaban un tiempo de disparo de 70milisegundos. [1]

Presentaron modelos de arco utilizados para representar una falla de arco eléctrico, para determinar cuál modelo era más preciso. El documento concluye con una comparación de

los modelos más representativos de arco. Los resultados serán útiles no sólo en la formación de arcos de detección de fallos, sino también en el diseño de esquemas de auto reconexión en las líneas de transmisión. Implementación y método de simulación se basan en ATP / EMTP. [2]

Se desarrollaron algunos métodos únicos de detección de fallas incipientes que llevan a arco eléctrico en media tensión (MT) y baja tensión (BT) de maniobra y dispositivos de control del motor. En MV de conmutación, bajo la formación de arcos de energía y degradación de aislamiento pueden ser detectados por el sensor de campo eléctrico diferencial (D-punto) y la bobina de Rogowski (RC), y la degradación térmica es detectado por el detector de ionización térmica (TID) en equipos de conmutación de BT. [3]

Este artículo muestra los resultados de pruebas para eventos de arco eléctrico en gabinetes eléctricos de media tensión y transformador en vivo. Ambos escenarios pueden dar lugar a más energía incidente que la predicción del IEEE 1584-2002. Mucho mayor que las energías esperadas, los cubículos de transformadores en vivo mostraron amplia variabilidad. Inesperadamente altas energías se midieron en múltiples configuraciones. [4]

Presentaron la protección digital de fases contra los defectos del arco eléctrico, la cual se basa en la extracción de los componentes de alta frecuencia de las corrientes de falla provocada por una falla de arco eléctrico, estas se extraen mediante un banco de filtros que se compone de cinco filtros modulados de manera exponencial Kaiser basados en ventanas de paso alto (HPF). Los resultados de las pruebas muestran que la protección digital tiene una sensibilidad menor para el tipo de falla de arco eléctrico o cargas alimentadas. [5]

En este trabajo se destacan resultados muy detallados obtenidos de las causas más comunes de un arco eléctrico que son la degradación del aislamiento y tensiones térmicas y las pruebas en laboratorio y las condiciones reales instalados. Desarrollado para dispositivos en media tensión y en centros de control de motores. Se integran a los sistemas de adquisición de datos (SCADA) de control existentes de protección lógico programable o control de supervisión. [6]

En este trabajo se presenta un análisis de partición de la energía entre los diversos procesos físicos durante la formación de un arco eléctrico, el cual se llevó a cabo para determinar la energía suministrada en la descarga, midiendo la tensión transitoria y formas de onda de corriente. Un modelo de análisis fue desarrollado que permite la estimación de la partición de la energía en la descarga. Los resultados obtenidos servirán en estudios de seguridad con respecto a los peligros asociados a las descargas de plasma. [7]

En este documento se describen los principios de protección diferencial de barras, así como los principios de enclavamiento para la protección contra la sobretensión. Se presentará un concepto de protección diferencial parcial, que puede ser utilizado en conjunción con selectivo de la zona de enclavamiento-(ZSI), o como copia de seguridad

para la protección de sobre corriente tradicional para lograr alta velocidad y eliminación de errores selectiva. [8]

Este trabajo se basa en los resultados de varios años de arco pruebas con circuitos a niveles de potencia de decenas de kilovatios a varios megavatios. Los objetivos de la prueba fueron comprender el comportamiento general de las fallas de arco en cuadros eléctricos para baja tensión, así suficientes para predecir el movimiento de los arcos-y diseñar sistemas de vigilancia electrónicos que son capaces de proteger contra los distribuidores de arcos. [9]

Lo que aquí se propone es la proyección de los equipos de protección por arco eléctrico en los gabinetes de servicios propios y centros de control de motores de las unidades 1 y 2, por lo que será necesario realizar un análisis de cortocircuito de las unidades, el estudio de los equipos de protección a utilizar y el análisis de arco eléctrico mediante una normativa que lo avale.

### **1.3 Justificación**

Vale la pena realizar este proyecto de implementación de los módulos de protección para asegurar la funcionalidad del esquema protecciones, control y medición, incrementando la confiabilidad en el proceso de generación y la versatilidad del sistema. Con esto se asegura la seguridad tanto del personal como de los equipos.

Se tiene objetivo el demostrar que al implementar los equipos de protección por arco eléctrico, se incrementara la seguridad del personal que labore en estos equipos cuando estén energizados, se reducirá el daño a los equipos y el tiempo de interrupción del proceso de generación será reducido, estos equipos están diseñados para trabajar en conjunto con el esquema de protección actual.

### **1.4 Objetivos**

Realizar la proyección del equipo de protección por arco eléctrico en las unidades 1 y 2 de la Central Hidroeléctrica Malpaso.

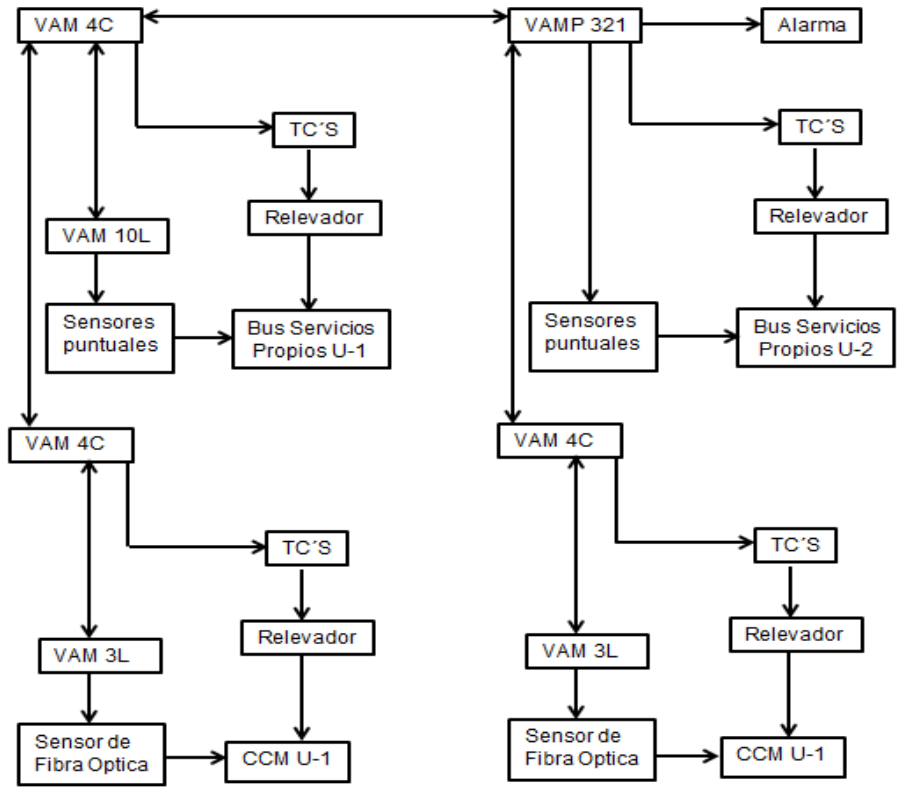
#### **Objetivos específicos**

Proyectar los equipos de protección por arco eléctrico en los gabinetes de servicios propios y CCM de las unidades 1 y 2.

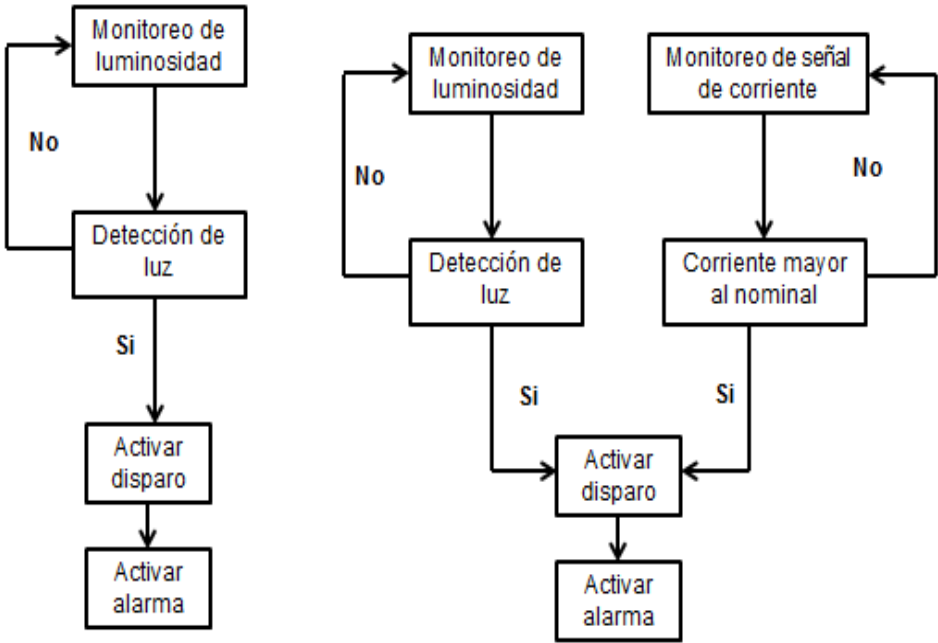
Realizar análisis de falla de cortocircuito y de arco eléctrico.

### **1.5 Metodología**

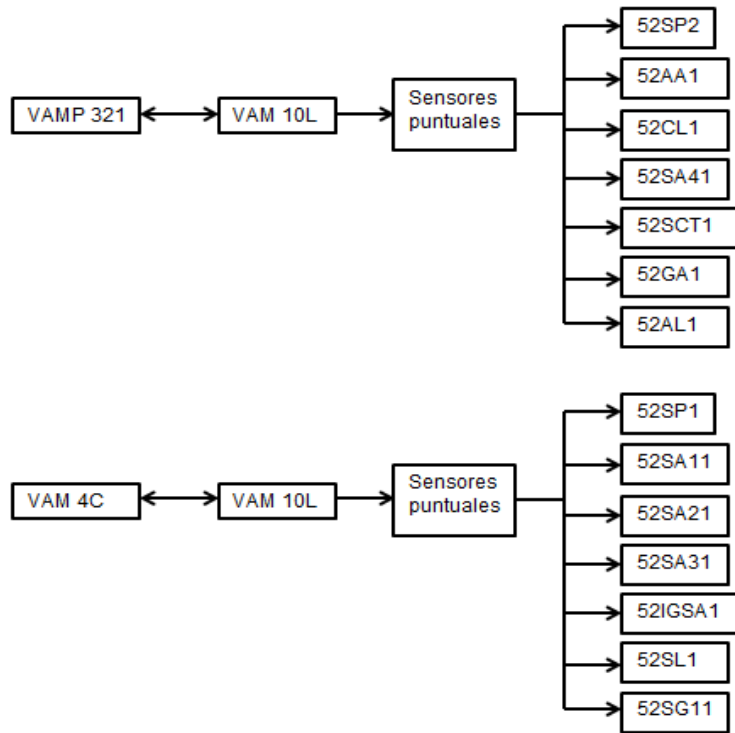
En la figura 1.1 se muestra el diagrama a bloques general de la proyección de los equipos de protección por arco eléctrico.



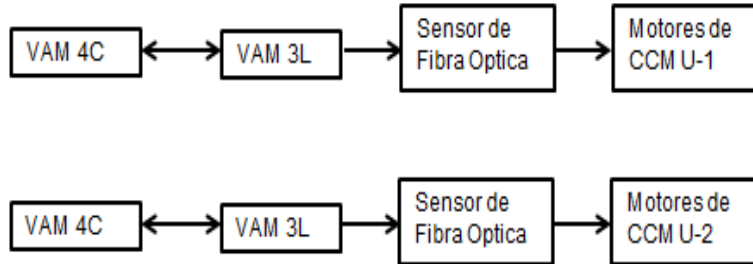
*Fig.1.1 Diagrama a bloques hardware de la proyección del equipo a usar en las unidades 1 y 2.*



*Fig.1.2 Diagrama a bloques software del funcionamiento de la protección por arco eléctrico.*



**Fig.1.3** Diagrama a bloques de sensores en gabinete de servicios propios U-2 arriba, U-1 abajo.



**Fig.1.4** Diagrama a bloques de sensor fibra óptica en CCM U-1 arriba, U-2 abajo.

**VAMP 321.-** Es el equipo central del sistema de protección, el cual se encarga del monitoreo de todos los demás equipos, la comunicación entre los equipos es por medio de fibra óptica, realiza mediciones de corriente por medio de un TC, posee compartimientos para el uso de sensores de luz puntuales o de fibra óptica y manda señal de cerrado de interruptores en caso que detecte anomalías.

**VAM 4C.-** Es una unidad auxiliar y se comunica principalmente con la unidad central, tienen la función de realizar mediciones de corriente por medio de un TC y manda señal de cerrado de interruptores en caso que detecte anomalías.

**VAM 10L.-** Esta unidad auxiliar es la que posee sensores puntuales encargados de detectar la presencia de luz en los equipos.



**VAM 3L.-** Su funcionamiento es similar al VAM 10L con la diferencia de que este hace uso sensores de fibra optica.

En cada gabinete de servicios propios se encuentran siete interruptores con diferentes alimentación para distintos procesos de la central, en cada interruptor se encuentra un sensor puntual para la detección de la luz emitida por la chispa provocada por un arco en el equipo. Para la unidad dos esto es realizado por el equipo VAMP 321 unidad central y para la unidad uno es realizado por el VAM 4C.

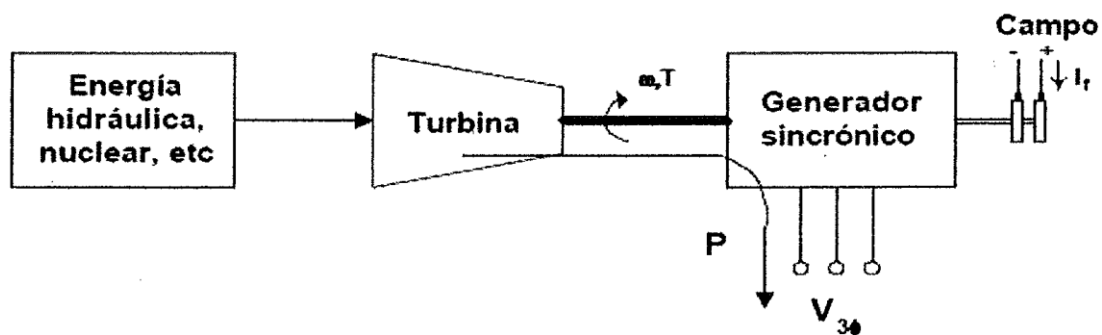
Para el CCM de ambas unidades es usado el VAM 3L el cual permite usar sensores de luz de fibra óptica, los cuales resultan más eficientes y económicos dado que son una mayor cantidad de equipos que se desea proteger. En ambos CCM es utilizado el VAM 4C para las mediciones de corriente y disparo.

Los equipos de protección contra arco eléctrico tienen dos modos de operación en donde el usuario escoge la más que efectiva le parezca, el funcionamiento por luz, y el funcionamiento por luz y corriente, para el caso de únicamente luz los sensores activan el disparo del sistema, en el funcionamiento por luz y corriente, además de las mediciones de los sensores, es utilizado un juego de TCS en donde se toman valores de corrientes nominales del equipo.

## 2. Fundamento Teórico

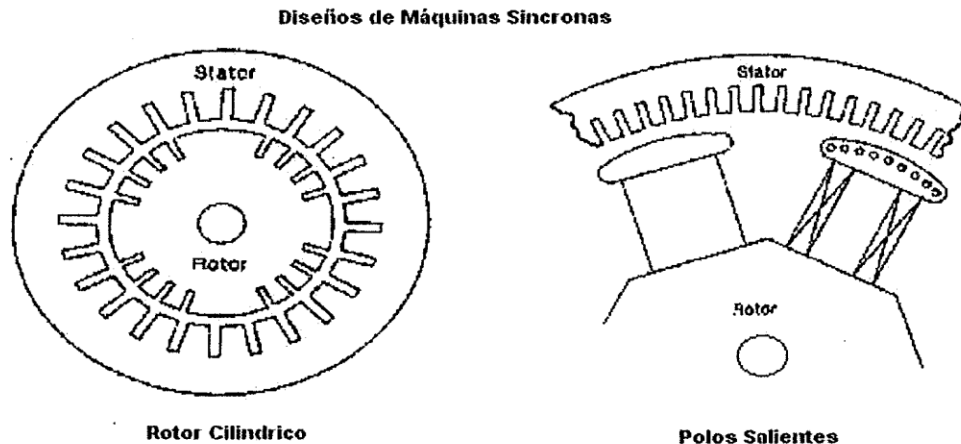
### 2.1 La Central Hidroeléctrica Malpaso

**Generadores.-** Un generador eléctrico síncrono convierte la energía mecánica de movimiento en energía eléctrica, en donde la energía cinética que se encarga de mover la flecha del generador o rotor se obtiene mediante la caída del agua. Los generadores impulsados por turbinas de vapor tienen rotores cilindricos con ranuras distribuidas donde se alojan los devanados o bobinas de campo y poseen de 2 a 4 polos.



*Fig.2.1 Esquema básico de generación de energía eléctrica.*

Los generadores impulsados por turbinas hidroeléctricas tienen rotores de polos salientes de núcleo laminado con una cantidad de 40-60 polos, los generadores hidroeléctricos de la central giran a una velocidad de 128 RPM. El diseño es de polos salientes, usado para máquinas con poca velocidad y con muchos polos, los generadores contienen 56 polos cada uno.



*Fig.2.2 Corte transversal de los dos tipos de rotores de la máquina síncrona.*

En generadores síncronos de baja velocidad y MVA nominales altos, como en el caso de las hidroeléctricas, el excitador no puede ser auto excitado, debido a las altas cantidades de corriente requeridas por el circuito de campo para su excitación y a la condición de que el excitador tiene que operar a la misma velocidad que el generador. En estos casos el excitador es activado por un excitador piloto que puede ser auto excitado o tener imanes permanentes, de esta última es la usada en la central.

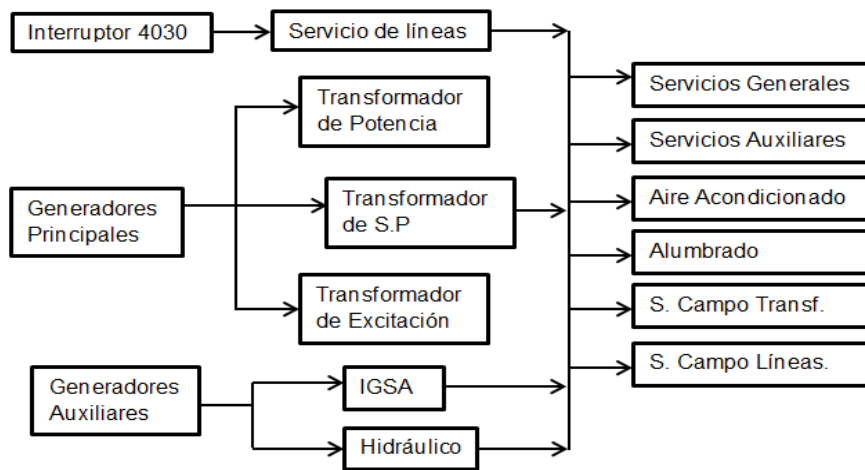
La velocidad de un generador síncrono, conocida como velocidad síncrona es constante y se define por  $n = \frac{120f}{p}$ ; donde “n” representa la velocidad del generador, “f” la frecuencia angular y “p” el número de polos de la máquina, para el caso de la central que cuenta con 56 polos a 60hz, la velocidad nominal es de 128 RPM. Una ventaja de los rotores de polos salientes es su costo, pues resultan más económicos de fabricar.

**Servicios propios.-** Los servicios propios son una parte vital para cualquier central generadora, puesto que proveen alimentación necesaria, la cual debe de ser continua y confiable en todas las unidades, además, por ser equipos que necesitan estar en constante funcionamiento es fundamental que sean seguras para no presentar fallas que puedan afectar su funcionamiento e interrumpir el proceso.

Los buses de servicios propios tienen alimentaciones diferentes, las cuales dependen de la necesidad de la central, para el funcionamiento en condiciones de operación normales se cuenta con una alimentación del exterior, por medio del circuito 4030 procedente de la

subestación de Malpaso 1, la cual suministra una tensión de 13.8kV y mediante dos transformadores uno para cada etapa reducen la tensión a 440V.

La segunda alimentación es por medio de los generadores, cada generador cuenta con un transformador de servicios propios, el cual reduce la tensión del generador de 15kV a 440V, esta forma de alimentación se da en caso que exista un problema con la S.E de Malpaso. Por último, se tienen los generadores auxiliares, tanto el generador diesel como el generador hidráulico, estos existen como última alternativa y se usa para el arranque negro, por ley es obligación de cada central tener al menos un generador auxiliar



*Fig.2.3 Diagrama a bloques de alimentaciones de bus 12.*



*Fig.2.4 Gabinete de servicios propios U-1 y U-2 de izquierda a derecha.*

Cada par de unidades esta eléctricamente diseñada en buses:12 para las unidades 1 y 2, 34 para las unidades 3 y 4, 56 para las unidades 5 y 6; en las cuales los enlaces de los servicios se realiza a través de interruptores a tensión de 440 V para alimentaciones de bus y enlaces. Las unidades 1 y 2 alimentan los servicios auxiliares, generales, aire acondicionado, alumbrado, subestación campo del transformador y subestación de campo de líneas.

**CCM.-** En los servicios auxiliares se encuentran los motores de inducción que regulan los procesos de los generadores, el CCM fue instalado con el fin de concentrar en un solo tablero todos los arrancadores de los equipos auxiliares de la unidad, ya que anteriormente se encontraban distribuidos en diferentes lugares, además proveen control y regulación a los procesos realizados.

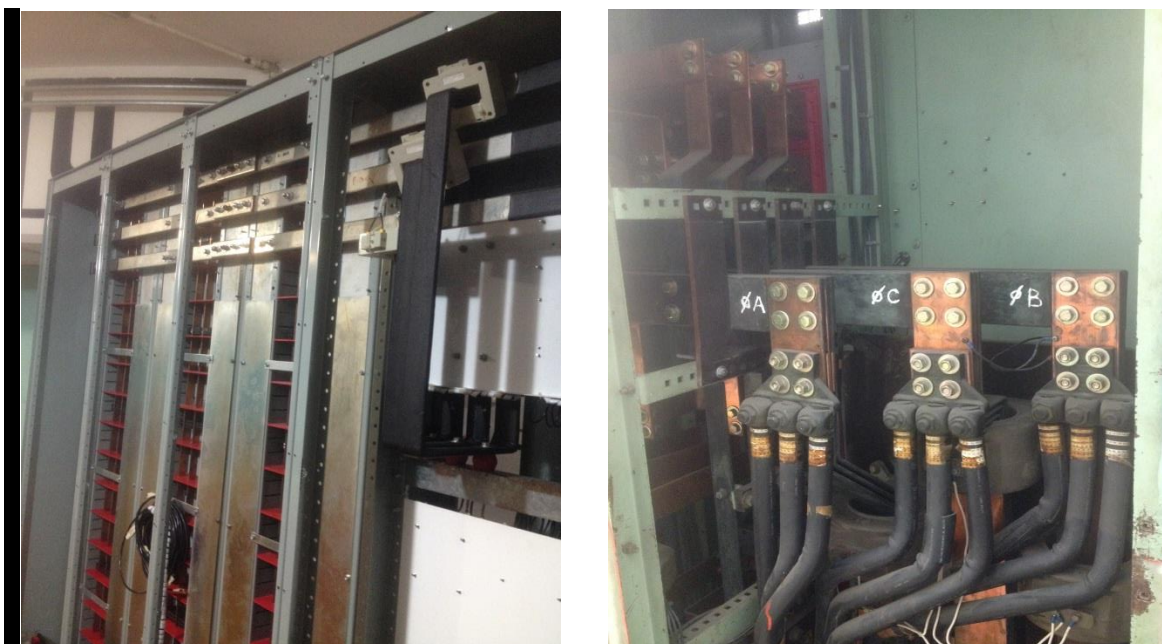




*Fig.2.5 Centro de Control de Motores U-2.*

**Bus.-** Cada nodo del sistema eléctrico de potencia se conoce como barra o bus, y es el punto donde se interconectan varias líneas en la red. En estos buses es donde se manejan los flujos de potencia, de ahí la importancia de protegerlos para evitar disturbios mayores del sistema. Cuando el bus se encuentra en óptimas condiciones de operación, la suma de las corrientes que entran y salen de la barra tiende a cero.

De manera que al ocurrir una falla en el bus, el equipo se desestabiliza, por lo que se utilizan protecciones por sobrecorriente, la cual se basa en la medición de las corrientes y la dirección de estas, si la corriente diferencial sobrepasa el valor del pick-up del relevador, este enviara una señal de disparo, librando los interruptores asociados a la barra, este ajuste del pick-up de las protecciones deberá ser el valor de corriente de cortocircuito del bus.



*Fig.2.6 Juegos de barras del CCM y servicios propios U-2 de izquierda a derecha.*

## **2.2 Corto circuito**

Una de las características primordiales de los sistemas eléctricos en su dinamismo y vulnerabilidad en cuanto a su estabilidad, en el proceso de suministro de energía a los usuarios. Esta estabilidad se ve afectada gravemente cuando en el sistema se presenta una de las características anormales más destructivas, un cortocircuito. El cortocircuito es la disminución repentina de la trayectoria normal de la corriente, provocando el flujo de una corriente de mayor magnitud comparada con la corriente normal de carga.

La corriente de cortocircuito depende de las impedancias de cada uno de los elementos que componen el sistema, a menor impedancia mayor nivel de corriente y viceversa. En el sistema eléctrico de potencia aproximadamente un 80% de las fallas son de fase a tierra, un



17% bifásicas o bifásicas a tierra y un 3% a las fallas trifásicas la cual debido a su condición de falla resulta ser la más severa y la que más daño puede ocasionar en una instalación y en los equipos.

El estudio de cortocircuito es necesario para determinar la red de tierras de la instalación, para la selección de los interruptores y equipos de protección, así como para sus ajustes que tendrán, para determinar los esfuerzos térmicos de los elementos del sistema para su diseño y para el conocer el tipo de reductor de corrientes de cortocircuito como el reactor necesario en la instalación.

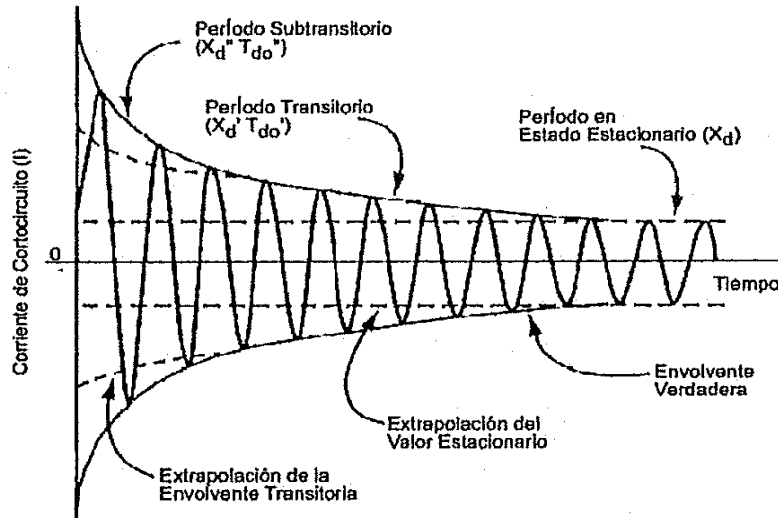
Para el estudio de cortocircuito se dividirán los elementos que intervienen en; elementos activos y pasivos, los activos son todos los elementos que contribuyen al cortocircuito, como el suministro exterior, transformadores, generadores, motores síncronos y los motores de inducción. Los elementos pasivos son aquellos que no contribuyen al cortocircuito como son las luminarias, reactores y conductores.

**Activos:** El generador eléctrico es un motor síncrono de gran magnitud que convierte la energía mecánica en eléctrica, el diseño depende del número de polos, la cantidad de bobinas y número de conductores. Al ocurrir una falla en el generador este para, sin embargo la energía producto de su propia FEM sigue impulsándola produciendo energía, por lo que contribuye a la falla, los transformadores proporcionan un valor elevado corriente de falla.

En una falla en un motor de inducción, este deja de alimentarse del sistema, sin embargo el movimiento generado por la inercia del rotor hace que contribuya a la falla, la aportación del motor de inducción disminuye con rapidez y solo perdura unos cuantos ciclos, por lo que se les contribuye un valor de reactancia subtransitoria y no tiene valor en el estado estable.

**Pasivos:** Los reactores, cables, barras y las impedancias de los generadores, motores y transformadores, ayudan a disminuir la corriente de cortocircuito del sistema, los reactores son bobinas en aire cuyo uso es como limitador de corriente, los cables y barras dependen del calibre y la longitud necesaria, las impedancias de los generadores y transformadores son suministrados por los fabricantes.

**ANSI:** De acuerdo a la norma ANSI, se definen tres tipos de corrientes de cortocircuito, las cuales dependen del marco de tiempo de interés tomado desde el inicio de la falla. La primera de ellas es la corriente de primer ciclo o momentáneas, la cual se determina por la reactancia subtransitoria ( $X_d''$ ), se encuentra pasado  $\frac{1}{2}$  ciclo de la falla, dependiendo de la constante de tiempo ( $T_d''$ ) en estas se encuentran la relación para el servicios de los interruptores en los circuitos para resistir corrientes de cortocircuito.



**Fig.2.7** Comportamiento de la corriente en una falla de acuerdo a norma ANSI.

La corriente de interrupción ( $X_d'$ ) se encuentra en el intervalo de tiempo de 5 ciclos, esta corriente relaciona a las corrientes percibidas por el equipo de interrupción al aislar una falla, por lo que se les llama corrientes de apertura de contacto y depende de la constante de tiempo ( $T_d'$ ). La corriente con tiempo de retardo o síncrona ( $X_d$ ) se encuentran hasta los 30 ciclos del inicio de la falla, estas corrientes se usan para sensar los relés con retardo y para evaluar la sensibilidad de los relés de sobre corriente.

Los valores de reactancias subtransitoria, transitorias y estables en los estados saturados o no saturados lo proporcionan los fabricantes, para cualquier estudio de cortocircuito en los generadores es necesario utilizar los valores de reactancias en saturado

Los motores que operan con valores superiores a 1000 HP o que operan con valores de tensión mayores a 600v tienen un valor elevado de potencia por lo que se consideran como elementos individuales y es primordial conocer su reactancia pues su contribución en un cortocircuito es significativa, para los motores menores a 100HP es recomendable juntar varios y representarlos en un mismo bus dado que individualmente su aporte es muy bajo llegando a ser despreciable.

X''d (%)	
RANGO	VALOR MÁS COMÚN
15-25	25

**Fig.2.8** Tabla de reactancias subtransitoria típica de máquinas de inducción.

CASOS	DATOS DE LOS MOTORES Y OTROS ELEMENTOS	REACTANCIA SUBTRANSITORIA X'd (%)	REACTANCIA TRANSITORIA X'd (%)
1	600V O MENOS-INDUCCIÓN	25,31	-
2	600V O MENOS-SÍNCRONOS	25	33
3	600V O MENOS-SÍNCRONOS INCLUYENDO CONDUCTORES Y TRANSFORMADOR REDUCTOR	31	39
4	ARRIBA DE 600V-INDUCCIÓN	20,26	-
5	ARRIBA DE 600V-SÍNCRONOS	15	25
6	ARRIBA DE 600V-SÍNCRONOS INCLUYENDO TRANSFORMADOR REDUCTOR	21	31

*Fig.2.9 Tabla de reactancias típicas para motores.*

Valores de reactancias para motores agrupados. En muchos estudios de cortocircuito, el número y tamaño de los motores ya sean síncronos o de inducción, no se conoce con precisión, sin embargo, el valor de la corriente de cortocircuito con que contribuyen se debe estimar, en tales casos las tablas 2.3 y 2.4 de reactancias se usa para tomar en consideración el número elevado de pequeños motores de inducción o síncronos

**Diagrama unifilar y de impedancias:** Para obtener un análisis eficiente de un circuito o red, del cual se realiza el estudio de cortocircuito, es conveniente saber obtener el diagrama unifilar y su correspondiente diagrama de impedancias. Para un circuito con un solo punto de alimentación, el cálculo de cortocircuito es relativamente fácil de realizar, sin embargo muy a menudo las redes se alimentan de varios puntos, y tendremos circuitos separados, circuitos parcialmente comunes o circuitos con mallas.

La determinación de las impedancias debe hacerse para todos los elementos que se tienen en la red; generadores, transformadores, motores, cables, reactores, etc. Si en la red se consideran principalmente los valores de reactancia de los generadores, transformadores y bobinas, existiendo líneas aéreas y o subterráneas de poca longitud o en paralelo, podrán omitirse. Para el caso de líneas de gran longitud su omisión supondría un incremento en la corriente de cortocircuito.

**Cantidades por unidad:** Para realizar los cálculos de cortocircuito, los valores de las impedancias, voltajes y corrientes se manejan en el sistema “por unidad o p.u” esto se debe a que los sistemas que se analizan se trabajan con diferentes niveles de tensión, lo que hace difícil el manejo de las redes, por lo que se establece este sistema en donde todos los valores se manejan en por unidad de un valor conocido. Generalmente la unidad base usada es el MVA ya que nos relaciona la tensión y la corriente.

**Sistema por unidad:**

$$\text{Corriente base } I_B = \frac{(MVA_B)(1000)}{\sqrt{3} (kV_B)} \text{ P.U}$$

$$\text{Impedancia base } Z_B = \frac{(kV_B)(1000)}{\sqrt{3} (I_B)} = \frac{kV_B^2}{MVA_B} \text{ P.U}$$

*Ec. 2.1 Ecuaciones para el cálculo de corriente e impedancia base.*

Generalmente las empresas al entregar un transformador lo hace con los datos de placa representados en porcentajes, para convertirlos a valor en p.u se utiliza:

$$\text{Impedancia } Z_{TRANSF} = \frac{(\%Z_{TRANSF})}{(MVA_{TRANSF})} \text{ P.U}$$

*Ec. 2.2 Ecuación para el cambio de valore de impedancia, de % a P.U.*

**Selección y cambio de bases:** Para efectuar el cambio de bases se establece que si:

$$Z_1 = \frac{Z(\text{ohm})}{(kV_{B1})^2} * MVA_{B1} \text{ P.U} \quad Z_2 = \frac{Z(\text{ohm})}{(kV_{B2})^2} * MVA_{B2} \text{ P.U}$$

$$Z_2 = Z_1 * \left( \frac{MVA_{B2}}{MVA_{B1}} \right) * \left( \frac{kV_{B1}}{kV_{B2}} \right)^2 \text{ P.U}$$

*Ec. 2.3 Ecuaciones para el cambio de base en las impedancias.*

**Valores de la corriente de cortocircuito:** Para el caso del cálculo de la corriente de cortocircuito trifásica basta con tener la red de secuencia positiva con la impedancia equivalente al punto de falla.

$$I_{cc} = \frac{E_1}{Z_1} = \frac{1}{Z_1}$$

*Ec. 2.4 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito trifásico en P.U.*

El equivale a la tensión en p.u, por lo que representa como 1, y Z1 es la impedancia equivalente al punto de falla de secuencia positiva en p.u. El valor obtenido estará dado en p.u, por lo que para obtener el valor en amperes se debe multiplicar por la corriente base.

$$I_{cc} = (MVA_B)(I_{cc})$$

*Ec. 2.5 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito trifásico en Amperes.*

Consultar el anexo A para obtención de las impedancias en p.u de los equipos.

### **2.3 El arco eléctrico**

El estudio del arco eléctrico surge del conocimiento de la corriente de cortocircuito, el arco se manifiesta en una liberación súbita y repentina de energía en forma de presión, calor y luz, lo cual causa daños a los equipos y ponen en peligro la seguridad del personal de operación, lo cual conlleva a pérdidas económicas y la interrupción del proceso de generación.

El arco eléctrico se define como el paso sustancial de energía a través del aire ionizado, el cual tiene una duración aproximada de menos de un segundo; sin embargo, debido a sus características y a la magnitud de la descarga, que sus consecuencias son fatales, al igual que las del fuego repentino, pues pueden llegar a incendiar o derretir cualquier equipo donde se encuentre.

**Etapas del arco eléctrico:** Las etapas del arco eléctrico se dividen en tres. La primera es la ráfaga de arco, la cual se debe a que las altas temperaturas ocasionadas por el arco eléctrico generan una onda explosiva que vaporiza el metal conductor. Los riesgos asociados son la alta presión, el sonido, que alcanza niveles superiores a los 160 decibeles, y el metal conductor fundido, que puede alcanzar velocidades.

La segunda etapa la representa el relámpago de arco, que alcanza temperaturas de hasta 19 mil grados centígrados. El relámpago de arco se presenta cuando una corriente eléctrica pasa de un conductor a otro sin que tengan contacto, solo por la ionización del aire entre conductores sin conexión a tierra o entre conductores con conexión a tierra y conductores sin conexión a tierra.

Finalmente, el choque eléctrico, tercera etapa, produce una estimulación repentina del sistema nervioso y la contracción convulsiva de los músculos, la exposición a estas temperaturas extremas causa quemaduras de piel y ocasiona que la ropa se incendie, lo que incrementa las lesiones por quemadura. La mayoría de las admisiones en hospitales por accidentes eléctricos se deben a quemaduras por arco eléctrico, no por choques eléctricos.

**Causas del arco eléctrico:** El arco eléctrico se puede originar por distintos factores, comúnmente se ocasionan por accidentes u operación incorrecta en el trabajo, por un mal diseño del sistema eléctrico, por equipos dañados o aislamientos defectuosos, objetos extraños dentro del equipo donde se originó la falla.

**Características del arco eléctrico:** La temperatura dentro del arco alcanza hasta los 20,000°C, la intensidad luminosa alcanza los 90,000 lux, en el caso del conductor de cobre las altas temperaturas lo convierten en gas, expandiendo su volumen hasta 67,000 veces su volumen creando presiones de 100 a 1000 libras por metro cuadrado, la corriente de arco eléctrico llega a representar el 30% de la corriente de cortocircuito calculada.



**Riesgos humanos por arco eléctrico:** La energía liberada al momento del relámpago puede ocasionar la muerte a una distancia de 3 metros (10 pies), quemaduras por las altas temperaturas, ceguera parcial o total por los altos niveles de luminosidad, sordera y daños a órganos por las altas presiones y envenenamientos por los compuestos químicos tóxicos liberados.

Las heridas por quemaduras resultan de las lesiones más dolorosas y debilitantes para quien las sufre; son fuente de desfiguramiento, por lo que ocasionan una profunda depresión en las personas que son atacadas por este tipo de lesiones, lo que resulta en afectaciones en la vida diaria de los lesionados y un impacto profundo en los familiares de la víctima.

**Afectaciones a las empresas:** Los costos económicos son altos, las pérdidas por reparación de los equipos, las compensaciones laborales y seguro de vida de los trabajadores, las pérdidas de producción en caso de que se tenga parar el sistema son muy elevados y varían del tiempo que quede fuera el sistema. Además de amonestaciones por partes del gobierno.

**Normatividades:** En México, no existe una normativa que indique el análisis o nivel de peligro en las áreas de trabajo, sino que se deja a las empresas la responsabilidad de proteger a los trabajadores, como son el análisis de riesgos a los que están expuestos los trabajadores, el equipo de protección personal necesario en cada área de trabajo y la identificación y señalamiento de áreas potencialmente peligrosas debido a su condición.

**EPP:** Del análisis de los niveles de energía incidente en el área de trabajo es posible saber el nivel de protección necesario para el EPP, debe poseer protección a la cabeza y cuerpo, la cual debe ser retardante a la flama, caretas o lentes para protección visual, y protección auditiva, no deberá impedir el movimiento del usuario y tiene que ser fácil y rápida vestimenta en caso de flameo.

Como se menciona, las quemaduras más severas pueden ser causadas por la misma ropa y no por la exposición a los fenómenos de arco o fuego repentino. Las prendas de uso diario que se encienden y derriten pueden causar mayores quemaduras en el cuerpo que donde no existía ropa. No tener vestimenta resulta menos riesgoso que utilizar ropa fabricada con materiales inflamables o fundibles.

Algunas de las telas inflamables más comunes son el algodón, la lana y la seda; mientras que algunas telas inflamables que se derriten son el poliéster, el nylon y el polipropileno. El arco eléctrico y el fuego repentino pueden prender o derretir la ropa convencional de trabajo y quemar la piel no protegida.

**Corriente de arco:** Para determinar el tiempo de operación de los dispositivos de protección es necesario conocer de antemano la corriente de arco eléctrico, para aplicaciones con voltajes menores a 1kV, en donde  $I_a$  es la corriente de arco en kA,  $K$  es

equivalente a -0.153 para sistemas abiertos o -0.097 gabinetes,  $I_{bf}$  es la corriente de cortocircuito en kA,  $V$  es el voltaje en kV y  $G$  es la distancia entre conductores en mm (si se desconoce este valor consultar anexo B).

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

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

*Ec. 2.6 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas menores a 1kV.*

Para sistemas con voltajes mayores a 1kV, y puede usarse para sistemas abiertos o en gabinetes cerrados.

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

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

*Ec. 2.7 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas mayores a 1kV.*

**Energía incidente:** Para determinar la energía incidente por el método empírico se determina el log10 de la energía incidente normalizada, la cual está dada a un tiempo de arco de 0.2 segundos con una distancia desde la fuente del arco hacia la persona de 610mm, en donde  $E_n$  es la energía incidente normalizada en J/cm<sup>2</sup>,  $K_1$  es igual a -0.792 para sistemas abiertos o -0.555 en gabinetes,  $K_2$  es 0 para sistemas sin puesta a tierra y -0.114 para sistemas aterrizados y  $G$  es la distancia entre conductores en mm (si se desconoce este valor consultar anexo A).

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

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

*Ec. 2.8 Ecuación para el cálculo de la energía incidente normalizada.*

Para convertir la ecuación normalizada a una con tiempo y distancia específicos, tenemos que suponer que  $E$  es la energía incidente en J/cm<sup>2</sup>,  $C_f$  es un factor que equivale a 1 para voltajes arriba de 1kV o 1.5 para menores a 1kV,  $E_n$  equivale a la energía incidente normalizada,  $t$  es el tiempo del arco en segundos,  $x$  es un exponente el cual depende del equipo (ver anexo),  $D$  es la distancia en mm desde la fuente del arco hacia la persona (ver anexo A por valores típicos de trabajo).

$$E = 4.184Cf * E_n * \frac{t}{0.2} * \frac{610^x}{D^x}$$

*Ec. 2.9 Ecuación para el cálculo de la energía incidente a valores específicos por el método empírico.*

Para sistemas trifásicos en subestaciones abiertas, sistemas de transmisión y sistemas de distribución, un método teórico es utilizado o en casos donde el voltaje sea mayor a 15kV o la distancia entre conductores este fuera del rango marcado. En estos casos la corriente de arco eléctrico y la corriente de cortocircuito son consideradas igual.

$$E = 2.142 * 10^6 * V * I_{bf} * \frac{t}{D^x}$$

*Ec. 2.10 Ecuación para el cálculo de la energía incidente a valores específicos por el método teórico.*

Para el cálculo de la barrera límite de arco eléctrico es necesario saber la distancia entre la fuente del arco y donde una persona recibiría una quemadura de segundo grado equivalente a  $5 J/cm^2$  de energía incidente. Donde  $D_b$  es la distancia en mm del límite de arco eléctrico a la fuente de esta y  $E_b$  es la energía incidente en  $J/cm^2$  a la distancia límite.

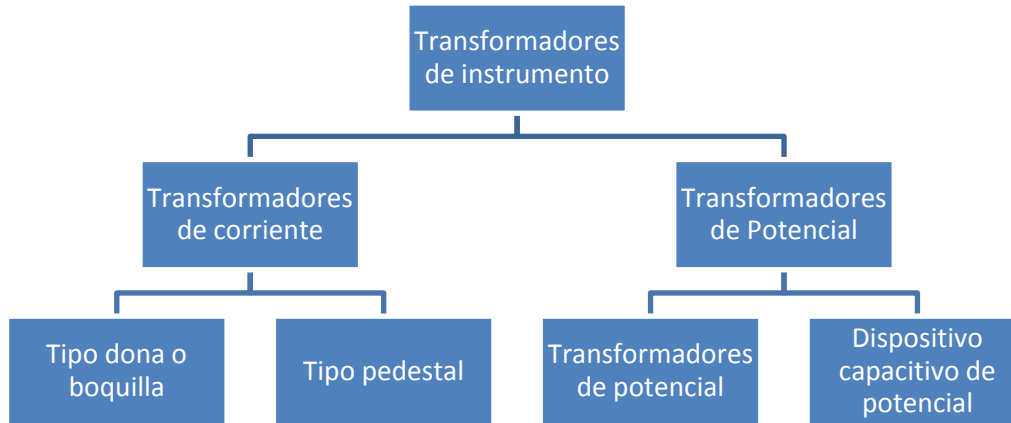
$$D_b = [4.184Cf * E_n * \frac{t}{0.2} * \frac{610^x}{E_b}]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_b = \sqrt[4]{2.142 * 10^6 * V * I_{bf} * \frac{t}{E_b}}$$

*Ec. 2.11 Ecuaciones para el cálculo de aproximación límite de arco por el método empírico (arriba) y el método teórico (abajo).*

## **2.4 Transformadores de instrumento**

La confiabilidad de los relevadores de protección depende directamente de las señales de entrada, para ello se emplean transformadores de instrumentos. Los transformadores de instrumentos son dispositivos especiales que reducen los niveles de voltaje y corriente del sistema primario a valores reducidos, en forma proporcional, para alimentar a los sistemas de protección, medición y control. Existen dos tipos básicos de transformadores de instrumentos y son; TC's y TP's.



*Fig. 2.10 Diagrama de tipos de transformadores de instrumento.*

Un transformador de corriente (TC) es un transformador en el que la corriente secundaria es proporcional a la corriente primaria, manejan una señal de corriente la cual es tomada en un circuito y la envía a un instrumento para especificación de sus características principales. Entre los factores que determinan la selección de estos aparatos se encuentran; el tipo de instalación, el tipo de aislamiento, la potencia nominal y la clase de precisión.

Los TC's pueden diseñarse para instalaciones interiores y exteriores, generalmente en instalaciones de baja y media tensión y hasta 25 kV se utilizan los de servicio interior. Se diseñan de dos formas distintas, uno los llamados boquilla y los de tipo pedestal, los de boquilla son construidos dentro de las boquillas de los equipos a medir (generadores, transformadores) y tienen un núcleo anular con diferentes derivaciones y los de tipo pedestal son construidos dentro de un receptáculo aislante, poseen un núcleo toroidal.

En cuanto al aislamiento se construyen con aislamiento en aire o en resina sintética siendo el caso para instalaciones interiores en baja tensión, para media tensión se utiliza aislamiento de aceite con envolvente de porcelana o con aislamiento en resina sintética, la mayoría de diseños utilizan material seco con aislamiento en aceite o masa aislante. Para alta tensión los equipos se aíslan con material dieléctrico impregnados en aceite y dentro de un envolvente de porcelana.

La potencia nominal de los TC's es la potencia aparente secundaria bajo corriente nominal determinada, considerando los errores que pudieran existir por efecto Joule en los buses. Para escoger la potencia nominal se debe hacer la suma de las potencias de todos los aparatos conectados en serie con el secundario. Se puede realizar dos o triple relación primaria dependiendo el uso.

Simple relación de transformación			Doble relación de transformación	
5	100	1200	2X5	2X100
10	150	1500	2X10	2X150
15	150	1500	2X15	2X200
15	200	2000	2X25	2X300
20	300	3000	2X50	2X400
25	-	-	2X75	2X600
30	400	4000	-	-
40	-	-	-	-
50	600	-	-	-
75	800	-	-	-

*Fig. 2.11* Tabla de valores normalizados para TC's según norma ANSI C.57.13.

Los TC's no son 100% precisos, es decir, no tienen una relación de transformación exacta, normalmente tienen un porcentaje de error, el cual se debe a factores como son; Variantes en el número de espiras, armado deficiente de los núcleos que producen flujos dispersos y baja calidad en la laminación de los núcleos. Estos errores en conjunto llegan a ser del 1% o menores y se deben a errores de ángulo y de relación. La clase de precisión es el producto de los errores de ángulo y relación.

Clase	Utilización
0.1	Calibración y medidas de laboratorio
0.2 – 0.3	Medidas de laboratorio
	Alimentación de wathorímetros para alimentadores de gran potencia
0.5 – 0.6	Alimentación de wathorímetros para facturación, en circuitos de distribución
1.2	Ampemetros indicadores
	Ampemetros registradores
	Fasómetros indicadores
	Fasómetros registradores
	Wathorímetros indicadores
	Wathorímetros registradores
	Wathorímetros industriales
Protecciones diferenciales, relevadores de distancia e impedancia	
3-5	Protección en general

*Fig. 2.12* Tabla de clase de precisión de los TC's.



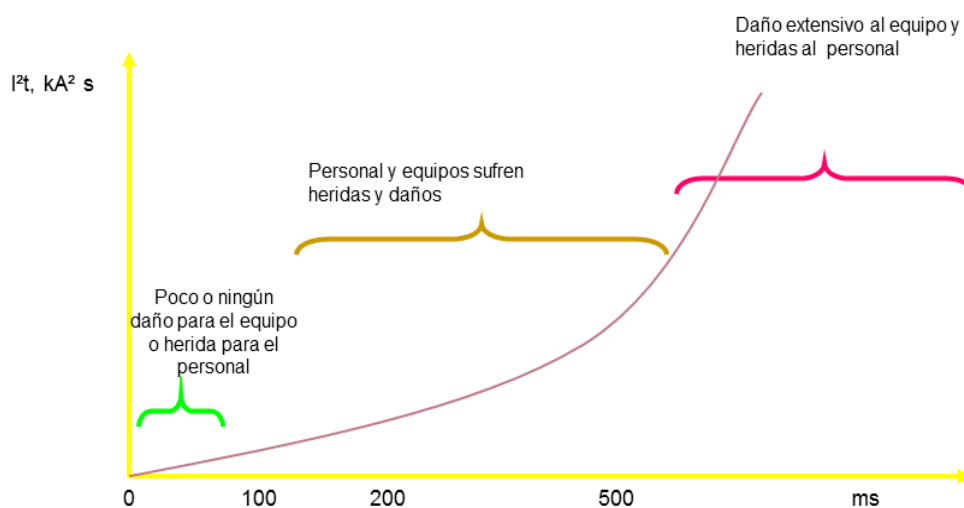
La selección de la clase de precisión depende de la utilización asignada, sin embargo deben tener una similitud en cuando a la exactitud de medición, las clases de precisión normales son: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1.2, 3 y 5 amperes, dependiendo la normativa. Para sistemas de protección se utilizan las clases de precisión de 5 y 10. La norma ANSI define la clase de precisión como el error máximo admisible en % que el transformador puede introducir.

Para poder evaluar los transformadores de corriente se requiere contar con la información del estudio de cortocircuito que indique la corriente máxima que soportara el transformador de corriente en casos de fallas muy cercanas al mismo, además de las impedancias de los relevadores y los conductores secundarios. Dependiendo el tipo de TC, puede ser de relación fija o múltiple, en cualquier caso se requiere de las curvas de saturación para determinar las condiciones de uso, las cuales suministra el fabricante.

## 2.5 Protecciones por arco eléctrico

El objetivo de los sistemas de protección es el de minimizar el daño en los equipos, reducir el tiempo de interrupción del proceso y el brindar seguridad al personal. El principio de operación de las protecciones de respaldo por sobre corriente eléctrica están basadas en el tiempo de operación para liberar una falla eléctrica, la cual depende de una detección adecuada del nivel de corriente de cortocircuito, en este sentido las protección operan librando las fallas en un tiempo de 130 a 500 ms.

Los relevadores diferenciales son las protecciones más usadas y seguras para proteger las barras o buses, mediante la conexión de transformadores de corriente a los circuitos en la barra y el relevador. Este tipo de relevador conecta a los circuitos secundarios de los TC's y realiza la comparación de la magnitud y ángulo de fase de las corrientes que entran y salen en la zona de operación indicada.



**Fig. 2.13** Grafica de daño de equipos de la corriente con el tiempo en ms.

Cuando la corriente diferencial sobrepasa un determinado porcentaje regulable de la corriente total que circula a través del elemento a proteger, se energiza la bobina del relevador y manda el disparo para liberar la falla, uno de los puntos importantes de estos equipos es la rapidez de operación para liberar la falla después de haber iniciado y el apoyo que tiene de parte del TC para detectarla.

**Métodos mecánicos de protección:** Los cubículos resistivos al arco proveen una barrera mecánica entre el operador y la falla, y redireccionan la energía de la explosión del arco desde el operador [11]. Puede ser que el cubículo sobreviva o no a la falla interna [12]. Esto significa que el corte de luz puede ser largo. Desde el punto de vista de seguridad, los cubículos resistivos al arco proveen protección al personal mientras las puertas están cerradas.

Sin embargo, en trabajos energizados es una práctica común el dejar las puertas abiertas lo que deja latente un escenario para lesiones [13]. Una opción para mejorar la seguridad es aumentar la distancia de operación y monitoreo. Esto se puede llevar a cabo vía la tecnología de control remoto, de tal manera que la operación de conmutación se pueda hacer fuera del área de peligro.

**Reducción de la energía incidente limitando corriente:** La energía incidente del arco interno depende de la tensión, corriente y tiempo. Al pensar en cómo eliminar el arco interno, normalmente la tensión del sistema no es lo que se pueda cambiar. Por otra parte, la corriente de falla puede ser limitada, esto se logra al incrementar la impedancia del sistema con selección de los transformadores, y reactores limitadores de corriente, el inconveniente de esto es el aumento de pérdidas.

Una de las mejores tecnologías conocidas usadas en limitar la corriente de falla son los fusibles limitadores de corriente. Cuando la corriente es suficientemente alta, los fusibles limitadores de corriente extinguen su arco interno antes de alcanzar la corriente cero. Esto acorta la duración del arco, y reduce la energía. Los fusibles limitadores de corriente proveen la acción de limitación de corriente solamente en casos de corriente de fallas altas [12].

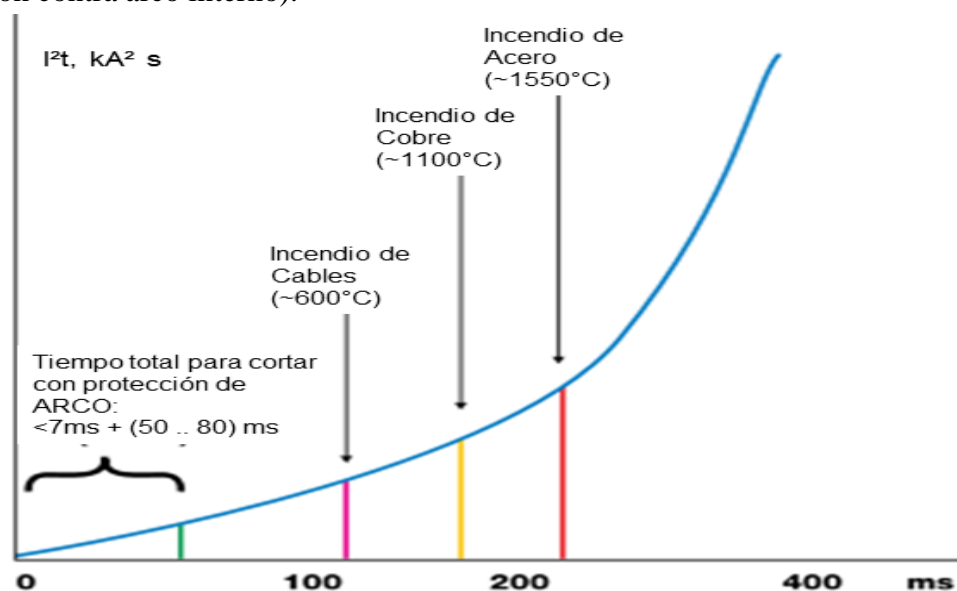
**Reducción de la energía reduciendo el tiempo de arco:** Los relés de alta velocidad son una de las maneras fáciles para reducir la energía incidente. Debido a que acelerando la protección normal, reduciendo los tiempos de operación, normalmente no es suficiente, entonces se necesita de una protección dedicada. Existen varios métodos para disminuir el tiempo de arco.

**El principio de la protección contra el arco interno basado en el Sensor óptico:** La falla de arco produce instantáneamente radiación que puede ser detectada analizando la Luz

visible. La protección contra el arco basado en el sensor óptico, permite un tiempo muy corto de eliminación de la falla, la operación de protección contra el arco interno se basa en las condiciones simultáneas de luz y sobre corriente de fase o de tierra. Para casos especiales se puede usar también la condición “solamente Luz” [14].

Los sensores de luz creados por arco pueden ser sensores ópticos de punto o de fibra óptica. La selección del tipo de sensor depende de la aplicación, para la medición de la corriente transformadores de corriente son utilizados. Además, debido a que la mayoría de fallas de arco interno empiezan como falla de fase a tierra, es esencial medir también la corriente de neutro, ya que de esta manera es posible eliminar la falla en etapas primeras.

El disparo del interruptor es iniciado por la protección dedicada contra el arco interno, o, por el relé común de protección numérica equipado con la opción de protección contra el arco interno. El disparo se inicia dentro de los 7ms (relé de protección dedicado contra arco interno), o dentro de los 15ms (relé de protección numérica equipado con la opción de protección contra arco interno).



*Fig. 2.14 Grafica de tiempo operación de equipos de protección de arco y de daño a equipos.*

**Protección por relés dedicados contra el arco interno:** La protección contra el arco interno suele ejecutarse en un sistema separado usando detectores de arco conectados a los relés de protección dedicados contra el arco interno, donde el sistema contiene sensores de arco, unidades esclavas colectando la información de los sensores de arco, y una unidad maestra o varias unidades para la colección final de todos los sensores, midiendo la corriente y disparando el interruptor si se detecta “Luz y Sobre corriente”.



**Fig. 2.15** Pruebas de arco eléctrico de 50kA a 500 ms sin protección de arco.



**Fig. 2.16** Pruebas de arco eléctrico de 50kA a 500 ms con protección de arco.

En aplicaciones de varias zonas las unidades maestras deben ser capaces para intercambiar información. La información de un sensor activo que detectó luz, se puede distribuir para todas las unidades a fin de que todas las que detectan sobre corriente puedan disparar el interruptor un sus zonas. De manera similar, la información de sobre corriente detectada localmente se pueda pasar a las otras unidades como condición de disparo si una unidad detecta luz pero no sobre corriente.

## 3. Desarrollo

### 3.1 Estudio de cortocircuito

Para el análisis de cortocircuito de las unidades 1 y 2 se tomó una base de potencia de 100MVA, la cual es una base tomada para cualquier análisis de cortocircuito en C.F.E y un voltaje base el cual será la del dispositivo de falla, en estos casos será de 0.44kV, el análisis de cortocircuito se realizó con la condición de falla más severa de todas, la trifásica, además, el análisis se realizó siguiendo los lineamientos de la empresa basados en componentes simétricas.

Se presentaran 2 casos de falla con 3 diferentes posibilidades, falla en el bus de servicios propios alimentado por servicio de líneas, por generador 1 y por generador 2, y falla en servicios auxiliares 1 por las mismas alimentaciones mencionadas. Para los servicios generales, campo del transformador y aire acondicionado se opta por dejar el valor total en p.u, dado que al ocupar varios motores el análisis termina siendo muy extenso, por lo que se ocupara el valor dado por la misma central.

Los datos de cada equipo podrán consultarse en anexo A.

Valores base a 0.44kV.

$$I_B = \frac{(100)(1000)}{\sqrt{3}(0.44)} = 131,215.97 A ; \quad Z_B = \frac{0.44^2}{100} = 1.936 \times 10^{-3} \Omega$$

*Ec. 3.1 Cálculo de corriente e impedancia base del sistema.*

Alimentación de circuito 4030:

$$Z_{SE1} = \frac{100}{250} = 0.4 p.u$$

Generadores 1 y 2:

$$Z_{GEN} = 0.18 * \frac{100}{218} = 0.0825 p.u$$

Para el caso del generador IGSA y GA que funcionan a 480 y 460 volts respectivamente, es necesario realizar un cambio de base del voltaje por el valor del punto de falla que se quiere conocer, la cual es de 440v, para el caso del generador IGSA su cambio de base será mostrado a modo de representar la operación necesaria para llevar a cabo el análisis correcto.

IGSA:



$$Z_{IGSA} = 0.18 * \frac{100}{0.4375} = 41.1428 p.u$$

$$Z_{IGSA} = 41.1428 * \left(\frac{0.48}{0.44}\right)^2 p.u$$

$$Z_{gen} = 48.9634 p.u$$

GA:

$$Z_{GA} = 0.18 * \frac{100}{1.5} = 41.1428 p.u$$

$$Z_{GA} = 41.1428 * \left(\frac{0.46}{0.44}\right)^2 p.u$$

$$Z_{GA} = 48.9634 p.u$$

Transformador TSP1:

$$Z_{TSP1} = 0.061 * \frac{100}{2} = 3.05 p.u$$

Transformador TSP2:

$$Z_{TSP2} = 0.0752 * \frac{100}{2} = 3.76 p.u$$

Transformador TSL1:

$$Z_{TSL1} = 0.08 * \frac{100}{0.75} = 10.6667 p.u$$

Los equipos son los mismos para los servicios auxiliares 2, 3 y 4, por lo que tendrían el mismo valor.

SA:

$$Z_{SA1-4} = 180.1446 p.u$$

SG:

$$Z_{SG} = 32.5724 p.u$$

SCT:

$$Z_{SCT} = 94.2438 p.u$$

SAA:

$$Z_{SAA} = 92.5925 \text{ p.u}$$

Reactor de servicios auxiliares y campo de transformador:

$$Z_{RSA1-4} = \frac{0.013}{1.936 \times 10^{-3}} = 6.7148 \text{ p.u}$$

$$Z_{RSCT} = \frac{0.013}{1.936 \times 10^{-3}} = 6.7148 \text{ p.u}$$

Reactor de servicios generales:

$$Z_{RSG} = \frac{0.01}{1.936 \times 10^{-3}} = 5.1652 \text{ p.u}$$

Cable TSL1 100m:

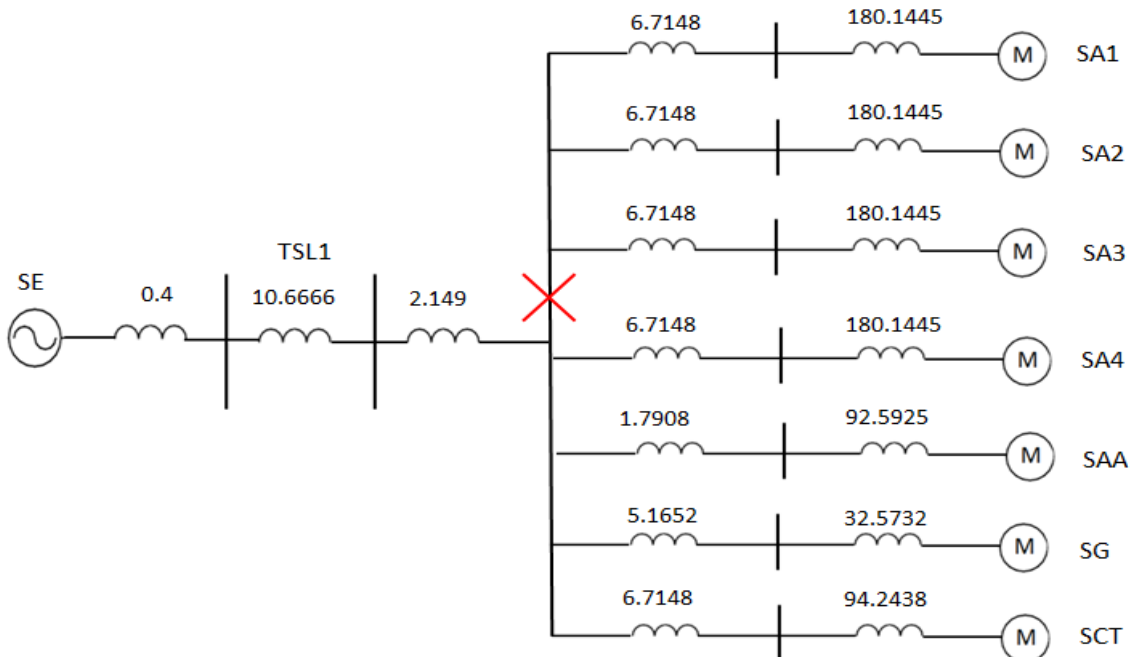
$$Z_{C1} = \frac{(0.1) * (0.124816)}{3 * (1.936 \times 10^{-3})} = 2.149 \text{ p.u}$$

Cable SAA 100m:

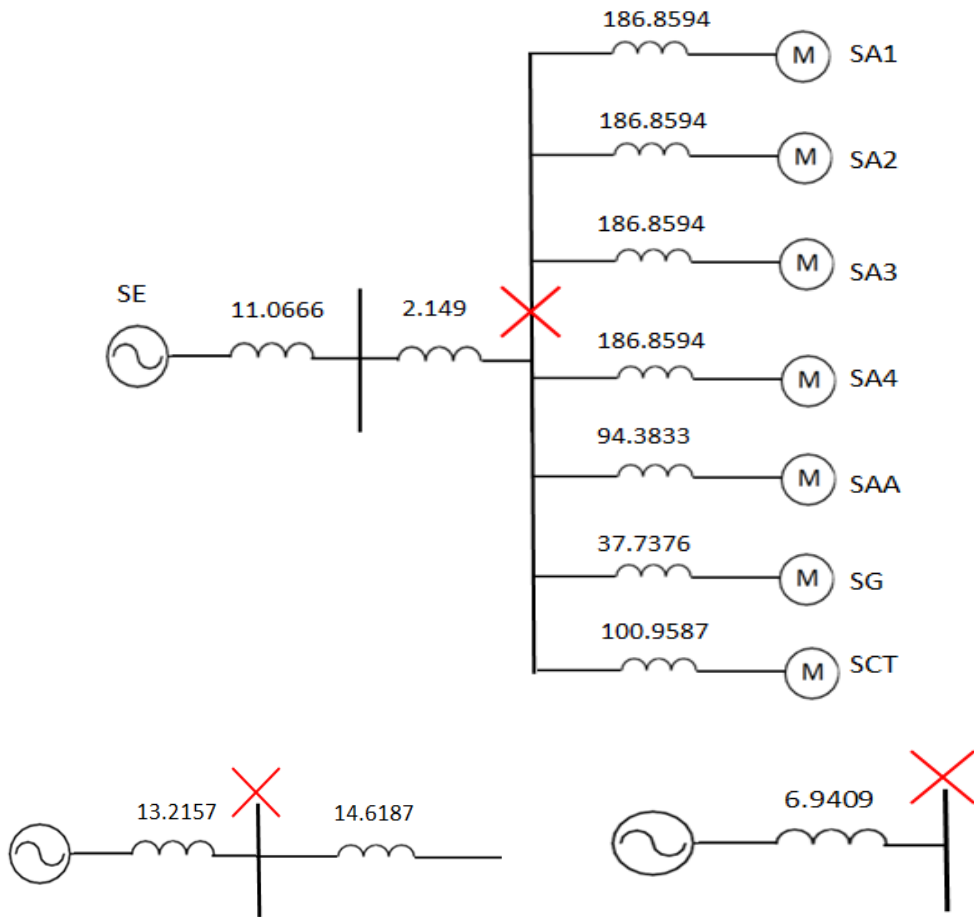
$$Z_{CL2} = \frac{(0.1) * (0.1040)}{3 * (1.936 \times 10^{-3})} = 1.7908 \text{ p.u}$$

*Ec. 3.2 Impedancias en p.u de las aportaciones de falla en bus 12.*

Calculando el cortocircuito en el bus de servicios propios, se realiza el diagrama de impedancias y se procede a reducirlo.



**Fig. 3.1** Diagrama de impedancias para una falla en bus 12 alimentado por servicios exteriores.



**Fig. 3.2** Reducción del diagrama de impedancias para una falla en bus 12 alimentado por servicios exteriores.

$Z_{eq} = 0.4 + 10.6666 = 11.0666 \text{ p.u}$  para los servicios línea y transformador

$Z_{eq} = 180.1446 + 6.7148 = 186.8594 \text{ p.u}$  para los servicios auxiliares

$Z_{eq} = 32.5724 + 5.1652 = 37.7376 \text{ p.u}$  para los servicios generales

$Z_{eq} = 94.2438 + 6.7148 = 100.9587 \text{ p.u}$  para el campo del transformador

$Z_{eq} = 92.5925 + 1.7908 = 94.3833 \text{ p.u}$  para aire acondicionado

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{100.1727} + \frac{1}{37.7384} + \frac{1}{92.5925} + (\frac{1}{186.8593} * 4)} = 14.6187 \text{ p.u}$$

para la reducción de SA, SG, SCT y SAA.

$Z_{eq} = 11.0666 + 2.149 = 13.2157 \text{ p.u}$  para el generador,  
transformador y cable

$$Z_{TOTAL} = \frac{(13.2157)(14.6187)}{13.2157 + 14.6187} = 6.9409 \text{ p.u}$$
 Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{6.9409} = 0.14407 \text{ p.u}$$
 corriente cortocircuito trifasica en p.u

$$I_{CC} = (0.14407)(131,215.97) = 18,904.67 \text{ A}$$
 corriente cortocircuito trifasica

*Ec. 3.3 Corriente de cortocircuito trifásica en bus 12 alimentado por servicios exteriores.*

Para el cortocircuito en bus 12 alimentado por el generador 1.

$$Z_{TOTAL} = \frac{(3.1326)(14.6187)}{3.1326 + 14.6187} = 2.5797 \text{ p.u}$$
 Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{2.5797} = 0.38762 \text{ p.u}$$
 corriente cortocircuito trifasica en p.u

$$I_{CC} = (0.38762)(131,215.97) = 50,863.12 \text{ A}$$
 corriente cortocircuito trifasica

*Ec. 3.4 Corriente de cortocircuito trifásica en bus 12 alimentado por generador 1.*

Para el cortocircuito en bus 12 alimentado por el generador 2.

$$Z_{TOTAL} = \frac{(3.8426)(14.6187)}{3.8426 + 14.6187} = 3.0427 \text{ p.u}$$
 Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{3.0427} = 0.32864 \text{ p.u}$$
 corriente cortocircuito trifasica en p.u

$$I_{CC} = (0.32864)(131,215.97) = 43,123.58 \text{ A}$$
 corriente cortocircuito trifasica

*Ec. 3.5 Corriente de cortocircuito trifásica en bus 12 alimentado por generador 2.*

Para el cortocircuito en bus 12 alimentado por IGSA.

$$Z_{TOTAL} = \frac{(48.9634)(14.6187)}{48.9634 + 14.6187} = 11.3660 \text{ p.u}$$
 Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{11.3660} = 0.08798 \text{ p.u}$$
 corriente cortocircuito trifasica en p.u

$$I_{CC} = (0.08798)(131,215.97) = 11,544.57 \text{ A}$$
 corriente cortocircuito trifasica

*Ec. 3.6 Corriente de cortocircuito trifásica en bus 12 alimentado por IGSA.*

Para el cortocircuito en bus 12 alimentado por GA.

$$Z_{TOTAL} = \frac{(13.1157)(14.6187)}{13.1157 + 14.6187} = 7.2006 \text{ p.u } Z \text{ equivalente en el punto de falla}$$

$$I_{CC} = \frac{1}{7.2006} = 0.13887 \text{ p.u corriente cortocircuito trifasica en p.u}$$

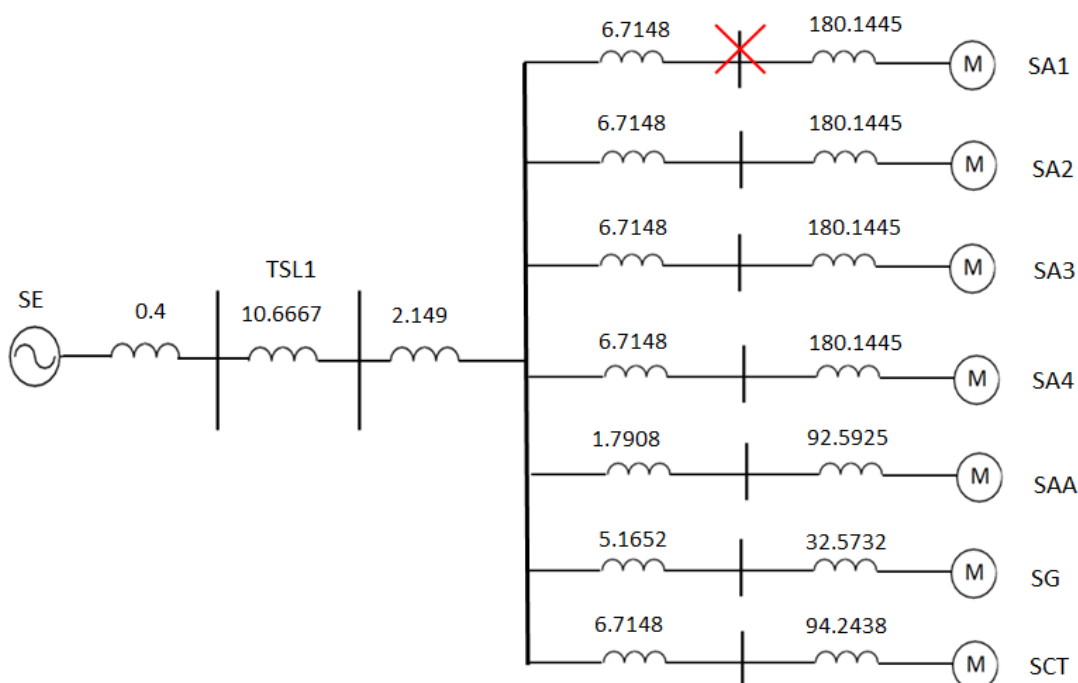
$$I_{CC} = (0.13887)(131,215.97) = 18,222.82 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.7 Corriente de cortocircuito trifásica en bus 12 alimentado por GA.*

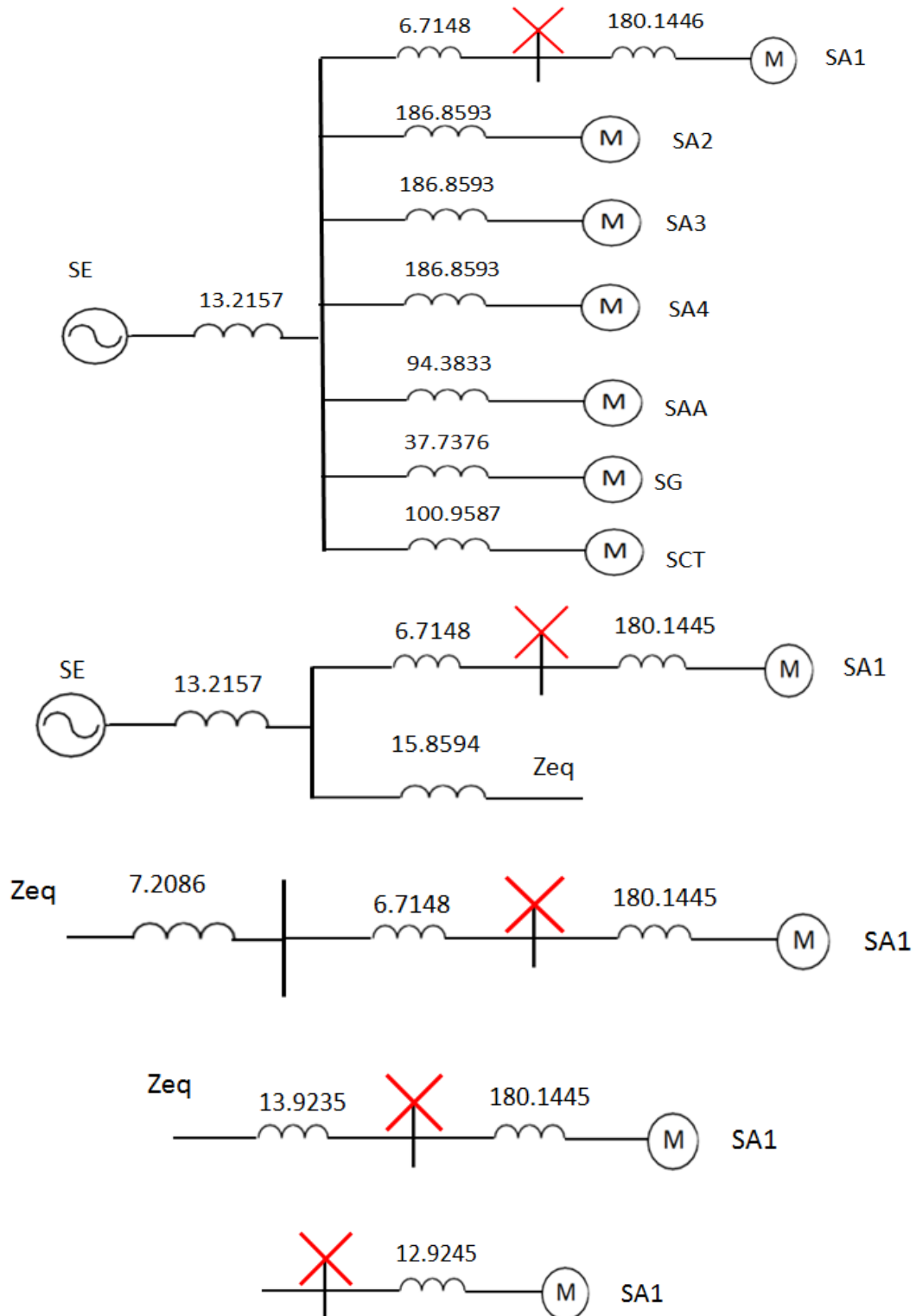
Alimentación	I <sub>cc</sub> en el punto de falla (kA)
SL1	18.904
GEN1	50.863
GEN2	43.123
IGSA	11.544
GA	18.222

*Fig. 3.3 Tabla de las corrientes de cortocircuito en bus 12 por las diferentes alimentaciones*

Para el análisis de la falla en el CCM de la unidad 1 se procede de la misma manera.



*Fig. 3.4 Diagrama de impedancias para una falla en CCM de S.A1 alimentado por servicios exteriores.*



*Fig. 3.5 Reducción del diagrama de impedancias para una falla en CCM de SA1 alimentado por servicios exteriores.*

$$Z_{eq} = 0.4 + 10.6666 + 2.2066 = 13.2157 \text{ p.u. para SL, transformador y cable}$$

$$Z_{eq} = 180.1445 + 6.714 = 186.8593 \text{ p.u. para los servicios auxiliares 2, 3 y 4.}$$

$$Z_{eq} = 32.5724 + 5.1652 = 37.7376 \text{ p.u. para los servicios generales}$$

$$Z_{eq} = 94.2438 + 6.7148 = 100.9587 \text{ p.u. para el campo del transformador}$$

$$Z_{eq} = 92.5925 + 1.7908 = 94.3833 \text{ p.u. para aire acondicionado}$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{100.9587} + \frac{1}{37.7376} + \frac{1}{94.3833} + \left(\frac{1}{186.8593} * 3\right)} = 15.8594 \text{ p.u.}$$

para la reduccion de SA, SG, SCT y SAA.

$$Z_{eq} = \frac{(13.2157)(15.8594)}{13.2157 + 15.8594} = 7.2086 \text{ p.u. Z equivalente en el punto de falla}$$

$$Z_{eq} = 7.2086 + 6.7148 = 13.9325 \text{ p.u. impedancia equivalente}$$

$$Z_{TOTAL} = \frac{(13.9325)(180.1446)}{13.9325 + 180.1446} = 12.9245 \text{ p.u.}$$

Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{12.9245} = 0.07737 \text{ p.u. corriente cortocircuito trifasica en p.u.}$$

$$I_{CC} = (0.07737)(131,215.97) = 10,152.46 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.8 Corriente de cortocircuito trifásica en CCM de SAI alimentado por servicios exteriores.*

Para el cortocircuito en CCM de SA1 alimentado por el generador 1.

$$Z_{eq} = \frac{(3.1326)(15.8594)}{3.1326 + 15.8594} = 2.6159 \text{ p.u. Z equivalente en el punto de falla}$$

$$Z_{eq} = 2.6159 + 6.7148 = 9.3307 \text{ p.u. impedancia equivalente}$$

$$Z_{TOTAL} = \frac{(9.3307)(180.1446)}{9.3307 + 180.1446} = 8.8712 \text{ p.u.}$$

Z equivalente en el punto de falla

$$I_{CC} = \frac{1}{8.8712} = 0.11272 \text{ p.u. corriente cortocircuito trifasica en p.u.}$$



$$I_{CC} = (0.11272)(131,215.97) = 14,791.21 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.9 Corriente de cortocircuito trifásica en CMM de SA1 alimentado por generador 1.*

Para el cortocircuito en CCM de SA1 alimentado por el generador 2.

$$Z_{eq} = \frac{(3.8426)(15.8594)}{3.8426 + 15.8594} = 3.0931 \text{ p.u } Z \text{ equivalente en el punto de falla}$$

$$Z_{eq} = 3.0931 + 6.7148 = 9.8079 \text{ p.u impedancia equivalente}$$

$$Z_{TOTAL} = \frac{(9.8079)(180.1446)}{9.8079 + 180.1446} = 9.3015 \text{ p.u}$$

*Z equivalente en el punto de falla*

$$I_{CC} = \frac{1}{9.3015} = 0.1075 \text{ p.u corriente cortocircuito trifasica en p.u}$$

$$I_{CC} = (0.1075)(131,215.97) = 14,106.91 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.10 Corriente de cortocircuito trifásica en CMM de SA1 alimentado por generador 2.*

Para el cortocircuito en CCM de SA1 alimentado por IGSA.

$$Z_{eq} = \frac{(48.9634)(15.8594)}{48.9634 + 15.8594} = 12.1021 \text{ p.u } Z \text{ equivalente en el punto de falla}$$

$$Z_{eq} = 12.1021 + 6.7148 = 18.8169 \text{ p.u impedancia equivalente}$$

$$Z_{TOTAL} = \frac{(18.8169)(180.1446)}{18.8169 + 180.1446} = 17.0373 \text{ p.u}$$

*Z equivalente en el punto de falla*

$$I_{CC} = \frac{1}{17.0373} = 0.05869 \text{ p.u corriente cortocircuito trifasica en p.u}$$

$$I_{CC} = (0.05869)(131,215.97) = 7,701.67 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.11 Corriente de cortocircuito trifásica en CMM de SA1 alimentado por IGSA.*

Para el cortocircuito en CCM de SA1 alimentado por GA.

$$Z_{eq} = \frac{(13.1157)(15.8594)}{13.1157 + 15.8594} = 7.4892 \text{ p.u } Z \text{ equivalente en el punto de falla}$$

$$Z_{eq} = 7.4892 + 6.7148 = 14.2040 \text{ p.u impedancia equivalente}$$

$$Z_{TOTAL} = \frac{(14.2040)(180.1446)}{14.2040 + 180.1446} = 13.1659 \text{ p.u}$$

*Z equivalente en el punto de falla*

$$I_{CC} = \frac{1}{13.1659} = 0.07695 \text{ p.u corriente cortocircuito trifasica en p.u}$$

$$I_{CC} = (0.07695)(131,215.97) = 9,966.32 \text{ A corriente cortocircuito trifasica}$$

*Ec. 3.12 Corriente de cortocircuito trifásica en CMM de SAI alimentado por GA.*

<i>Alimentación</i>	<i>Icc en el punto de falla (kA)</i>
<i>SL1</i>	<i>10.152</i>
<i>GEN1</i>	<i>14.791</i>
<i>GEN2</i>	<i>14.106</i>
<i>IGSA</i>	<i>7.701</i>
<i>GA</i>	<i>9.966</i>

*Fig. 3.6 Tabla de las corrientes de cortocircuito en CCM de SAI por las diferentes alimentaciones*

### **3.2 Análisis de arco eléctrico**

Para el estudio de arco eléctrico es necesario tener a la mano los resultados del análisis de cortocircuito. El primer análisis se realiza tomando como base los datos de cortocircuito del bus 12 alimentado por servicio de líneas, y se realizara tomando dos tiempos de duración de arco; de 500 ms y de 70ms, siendo este último el tiempo estimado de activación de los equipos a implementar en la central. La distancia entre barras de este bus es de 68mm, otros datos se tomaran de acuerdo al anexo B.

$$I_{CC} = 18.9046 \text{ kA}$$

$$\log I_a = -0.097 + (0.662 * \log 18.9046) + (0.0966 * 0.44) + (0.000526 * 68) + (0.5588 * 0.44 * \log 18.9046) - (0.00304 * 68 * \log 18.9046)$$

$$\log I_a = 0.8763$$

$$I_a = 10^{0.8763}$$

$$I_a = 7.5221 \text{ kA}$$

*Ec. 3.13 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas menores a 1kV*

Energía incidente normalizada

$$\log E_N = -0.555 - 0.113 + (1.081 \log 7.5221) + (0.0011 * 68)$$

$$\log E_N = 0.3541$$

$$E_N = 10^{0.3541}$$

$$E_N = 2.2600 \text{ Joule/cm}^2$$

Energia incidente:

$$E = 4.184 * 1.5 * 2.2600 * \frac{0.5}{0.2} * \frac{610^{1.473}}{457.2^{1.473}}$$

$$E = 54.2253 \text{ Joule/cm}^2$$

$$E = \frac{54.2253}{4.184}$$

$$E = 12.96 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_b = [4.184 * 1.5 * 2.2600 * \frac{0.5}{0.2} * \frac{610^{1.473}}{5}]^{1.473}$$

$$D = 2306.27 \text{ mm}$$

*Ec. 3.14 Ecuaciones para el cálculo de arco eléctrico en bus 12 alimentado de servicio de línea a 500ms.*

Energia incidente:

$$E = 4.184 * 1.5 * 2.2600 * \frac{0.07}{0.2} * \frac{610^{1.473}}{457.2^{1.473}}$$

$$E = 7.5915 \text{ Joule/cm}^2$$

$$E = \frac{7.5915}{4.184}$$

$$E = 1.81 \text{ cal/cm}^2$$

$$D_b = [4.184 * 1.5 * 2.2600 * \frac{0.07}{0.2} * \frac{610^{1.473}}{5}]^{1.473}$$

$$D = 607.05 \text{ mm}$$

*Ec. 3.15 Ecuaciones para el cálculo de arco eléctrico en bus 12 alimentado de servicio de línea a 70ms.*

<i>Alimentación</i>	<i>I<sub>cc</sub> en el punto de falla (kA)</i>	<i>Corriente de arco (kA)</i>	<i>Distancia limite (mm)</i>	<i>Energía incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</i>
<i>SL1</i>	<i>18.904</i>	<i>7.522</i>	<i>2306.27</i>	<i>12.96</i>
<i>GEN1</i>	<i>50.863</i>	<i>15.056</i>	<i>3837.83</i>	<i>27.44</i>
<i>GEN2</i>	<i>43.123</i>	<i>13.410</i>	<i>3525.31</i>	<i>24.21</i>
<i>IGSA</i>	<i>11.544</i>	<i>5.323</i>	<i>2135.06</i>	<i>11.56</i>
<i>GA</i>	<i>18.222</i>	<i>7.33</i>	<i>2700.32</i>	<i>16.35</i>

*Fig. 3.7 Tabla de las corrientes de cortocircuito en bus 12 por las diferentes alimentaciones a 500ms.*

<i>Alimentación</i>	<i>I<sub>cc</sub> en el punto de falla (kA)</i>	<i>Corriente de arco (kA)</i>	<i>Distancia limite (mm)</i>	<i>Energía incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</i>
<i>SL1</i>	<i>18.904</i>	<i>7.522</i>	<i>607.05</i>	<i>1.81</i>
<i>GEN1</i>	<i>50.863</i>	<i>15.056</i>	<i>1010.19</i>	<i>3.84</i>
<i>GEN2</i>	<i>43.123</i>	<i>13.410</i>	<i>927.93</i>	<i>3.38</i>
<i>IGSA</i>	<i>11.544</i>	<i>5.323</i>	<i>561.99</i>	<i>1.61</i>
<i>GA</i>	<i>18.222</i>	<i>7.33</i>	<i>710.77</i>	<i>2.28</i>

*Fig. 3.8 Tabla de las corrientes de cortocircuito en bus 12 por las diferentes alimentaciones a 70ms.*

A continuación se realiza el estudio de arco eléctrico para el bus del CCM de SA1 tomando los valores del análisis de cortocircuito anterior, se realiza tomando en cuenta los dos tiempos de 500ms y 70ms, siendo el último el tiempo de los equipos a implementar en la central. La distancia de barras del CCM de acuerdo a la medición es de 76mm, otros datos serán tomados del anexo B.

$$I_{CC} = 10.152 \text{ kA}$$

$$\log I_a = -0.097 + (0.662 * \log 10.152) + (0.0966 * 0.44) + (0.000526 * 76) + (0.5588 * 0.44 * \log 10.152) - (0.00304 * 76 * \log 10.152)$$

$$\log I_a = 0.6667$$

$$I_a = 10^{0.6667}$$

$$I_a = 4.6425 \text{ kA}$$

*Ec. 3.16 Ecuación para el cálculo de corriente de cortocircuito en sistemas menores a 1kV*

Energía incidente normalizada

$$\log E_N = -0.555 - 0.113 + (1.081 \log 4.6425) + (0.0011 * 76)$$

$$\log E_N = 0.1363$$

$$E_N = 10^{0.1363}$$

$$E_N = 1.3688 \text{ Joule/cm}^2$$

Energía incidente

$$E = 4.184 * 1.5 * 1.3688 * \frac{0.5}{0.2} * \frac{610^{1.641}}{457.2^{1.641}}$$

$$E = 34.4732 \text{ Joule/cm}^2$$

$$E = \frac{34.4732}{4.184}$$

$$E = 8.23 \text{ cal/cm}^2$$

$$Db = [4.184 * 1.5 * 1.3688 * \frac{0.5}{0.2} * \frac{610^{1.641}}{5}]^{\frac{1}{1.641}}$$

$$Db = 1482.79 \text{ mm}$$

*Ec. 3.17 Ecuaciones para el cálculo de arco eléctrico en CCM de SA1 alimentado de servicio de línea a 500ms.*

Energía incidente

$$E = 4.184 * 1.5 * 1.3688 * \frac{0.07}{0.2} * \frac{610^{1.641}}{457.2^{1.641}}$$

$$E = 4.8262 \text{ Joule/cm}^2$$

$$E = \frac{4.8262}{4.184}$$

$$E = 1.15 \text{ cal/cm}^2$$

$$Db = [4.184 * 1.5 * 1.3688 * \frac{0.07}{0.2} * \frac{610^{1.641}}{5}]^{\frac{1}{1.641}}$$

$$Db = 447.45 \text{ mm}$$

*Ec. 3.18 Ecuaciones para el cálculo de arco eléctrico en CCM de SA1 alimentado de servicio de línea a 70ms.*

<i>Alimentación</i>	<i>Icc en el punto de falla (kA)</i>	<i>Corriente de arco (kA)</i>	<i>Distancia limite (mm)</i>	<i>Energía incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</i>
<i>SL1</i>	<i>18.904</i>	<i>4.642</i>	<i>1482.79</i>	<i>8.23</i>
<i>GEN1</i>	<i>50.863</i>	<i>5.989</i>	<i>1753.78</i>	<i>10.85</i>
<i>GEN2</i>	<i>43.123</i>	<i>5.800</i>	<i>1717.03</i>	<i>10.48</i>
<i>IGSA</i>	<i>11.544</i>	<i>3.850</i>	<i>1310.94</i>	<i>6.73</i>
<i>GA</i>	<i>18.222</i>	<i>4.584</i>	<i>1470.61</i>	<i>8.12</i>

*Fig. 3.9 Tabla de las corrientes de cortocircuito en CCM de SA1 por las diferentes alimentaciones a 500ms.*

<i>Alimentación</i>	<i>Icc en el punto de falla (kA)</i>	<i>Corriente de arco (kA)</i>	<i>Distancia limite (mm)</i>	<i>Energía incidente (cal/cm<sup>2</sup>)</i>
<i>SL1</i>	<i>18.904</i>	<i>4.642</i>	<i>447.45</i>	<i>1.15</i>
<i>GEN1</i>	<i>50.863</i>	<i>5.989</i>	<i>529.19</i>	<i>1.51</i>
<i>GEN2</i>	<i>43.123</i>	<i>5.800</i>	<i>518.13</i>	<i>1.46</i>
<i>IGSA</i>	<i>11.544</i>	<i>3.850</i>	<i>395.59</i>	<i>0.94</i>
<i>GA</i>	<i>18.222</i>	<i>4.584</i>	<i>443.77</i>	<i>1.13</i>

*Fig. 3.10 Tabla de las corrientes de cortocircuito en CCM de SA1 por las diferentes alimentaciones a 70ms.*

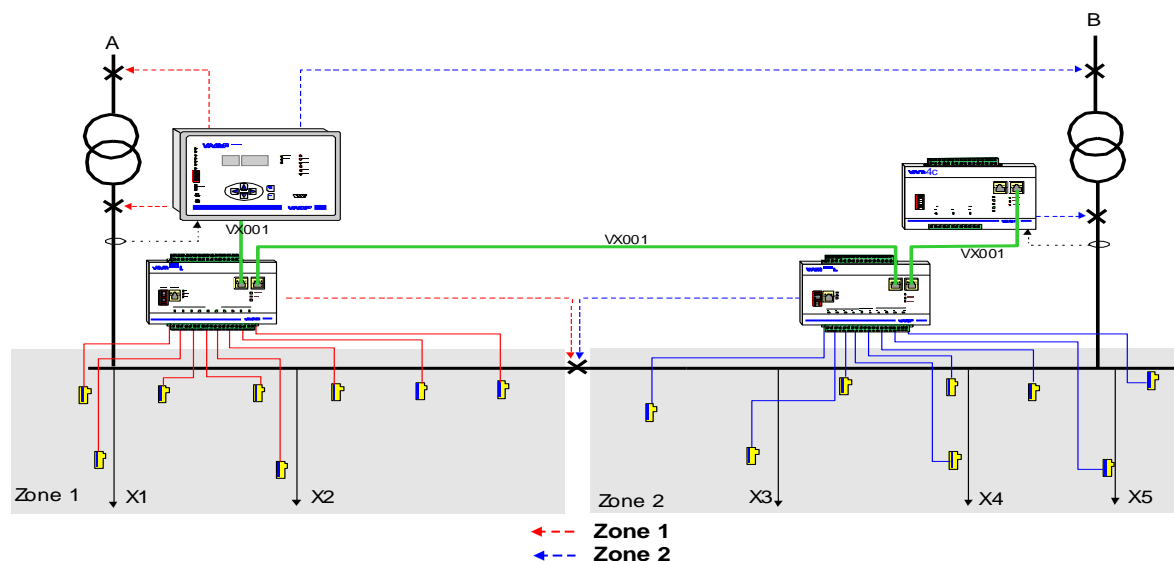
### **3.3 Equipos a utilizar**

La meta de la protección de arco es detectar el arco eléctrico y minimizar el tiempo de quemado para proteger los equipos y el personal. Para lograr esto, la protección debe detectar el arco y después interrumpir el flujo de corriente con su respectivo interruptor de circuito, estos sistemas inteligentes operan bajo dos condiciones simultáneas; luz y corriente.

**VAMP 321:** El sistema de protección contra arco eléctrico está conformado por una unidad maestra que cuenta con un relevador de protección. El Sistema cuenta con Unidades de Expansión o esclavas unas capaces de conectar hasta 10 sensores ópticos puntuales y otras capaces de conectar hasta 3 sensores de lazo tipo fibra óptica flexible y así detectar fallas por luz de arco eléctrico con una longitud de onda de 300 a 1500nm y una intensidad de más de 8000 luxes.

El sistema debe ser Selectivo 100%, mediante sensores puntuales para detectar luz de arco como evento de falla o por luz y corriente, en esta ultima la unidad central y una unidad esclava diferente a la de los sensores, poseen los medios para verificar la existencia de sobre corriente, ya sea entre fases o fase a tierra, es preferible la segunda configuración para evitar disparos en falso causados por reflexiones de luz en los equipos.

El Sistema debe ser capaz de indicar la ubicación de la falla tanto la unidad maestra como en la unidad de extensión, indicando en ambas unidades el sensor que detecto la falla. En la unida maestra se deberá desplegar automáticamente la dirección de la unidad de extensión y el número de sensor donde ha operado el sistema; y localmente, en la unidad de extensión, se debe contar con indicación luminosa para el respectivo sensor que detectó la falla.



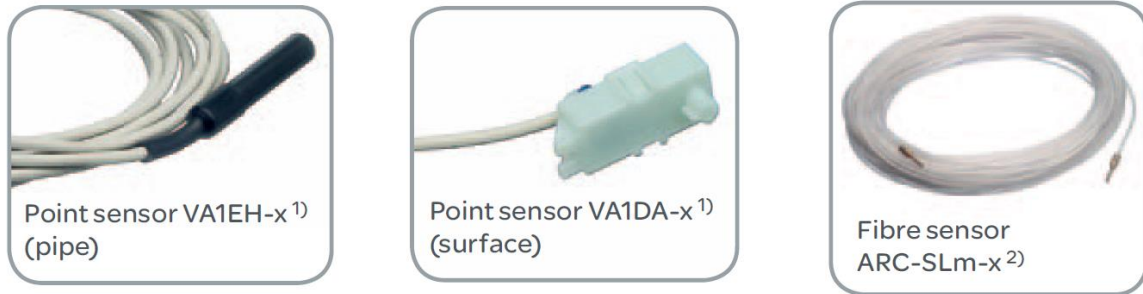
*Fig. 3.11 Equipos VAMP de protección de arco eléctrico.*

Equipo	Cantidad	Descripción
VAMP 321	1	Unidad maestra, código de pedido “ ”.
VAM 4C	3	3 Entradas de corriente, 1 relé de disparo.
VAM 3L	2	3 Lazos de fibra, 1 relé de disparo.
VAM 12L	1	10 Entradas de sensores, 3 relés de disparo.
ARC-SLm-x	2 x 50m	Sensor de fibra, 8000 lux.
VA1DA-6	14	Sensor de arco, longitud de cable de 6 m.
Vx001-XX	3x60m, 3x1m	Cable modular VAM<->VAM
VX052-3	1	Cable de programación USB (VAMPSET)
VYX001	14	Placa de montaje para sensor, forma Z
TC'S	4 Juegos.	TC's de medición para los equipos VAMP Y VAM 4C.

*Fig. 3.12 Equipos VAMP de protección de arco eléctrico a utilizar.*

VAMPSET es el software utilizado por el procesador VAMP 321 para establecer parámetro y configuraciones, esos datos pueden intercambiarse entre el sistema VAMP 321 y la PC, además incorpora herramientas para el análisis de eventos, formas de onda y tendencias de los datos registrados, información requerida al momento de una falla para su análisis.





**Fig. 3.13 Puertos de comunicación y conectores.**

El VAMP 321 incluye funciones de protección por arco eléctrico, así como por sobrecorriente y supervisión de arco, puede aplicarse para protección de arco en bajo y medio voltaje. La unidad VAMP 321 está diseñada para ser la unidad principal del sistema de protección por arco, la cual incluye unidades esclavas como son; VAM 10L, VAM 12L, VAM 4C, VAM 3L, además de sensores puntuales y de fibra las cuales se conectan con las esclavas o con la maestra.

La protección por arco eléctrico contiene ocho etapas, las cuales pueden usarse para activar los contactos, estas etapas se activan con las señales de corriente y luz o solo luz, dependiendo su aplicación. La localización de las señales de corriente y de luz para las etapas de arco se define por tres matrices de protección; corriente, luz y salida de matriz, las matrices se programan de acuerdo a las señales deseadas.

Equipo	Descripción
VAMP 321	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente trifásica, tensión y corriente de secuencia cero.</li> <li>• Registrador de eventos, de disturbios y reloj de tiempo real.</li> <li>• Operación simultanea por corriente y luz, o solo luz.</li> <li>• Comunicación SCADA.</li> <li>• Zonas de operación programables.</li> <li>• Sistema de auto-supervisión.</li> <li>• Cuatro contactos normalmente abiertos.</li> <li>• Contacto de disparo, 7 ms.</li> <li>• Contactos de disparo de alta velocidad, 2 ms.</li> <li>• Supervisión continúa de sensores.</li> <li>• Conexión para sensor portátil.</li> <li>• Indicación de activación de sensor de luz/canal de disparo y relevadores de disparo.</li> </ul>
VAM 4C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de corriente de 3 fases o 2 fases y 1 de secuencia cero.</li> <li>• Ajustes de Pick-up ajustables.</li> <li>• Indicador de activación del canal de corriente, desbalance de</li> </ul>

	<p>corriente y relé de disparo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un relé de disparo.</li> </ul>
VAM 3L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supervisión continua de sensores</li> <li>• Conexión para sensor portable</li> <li>• Indicación de activación de sensor de luz/canal de disparo y relevadores de disparo.</li> <li>• Un relé de disparo.</li> </ul>
VAM 10L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexión hasta con 10 sensores puntuales de arco</li> <li>• Supervisión continua de los sensores</li> <li>• Conexión al sensor de arco portátil</li> <li>• Indicación del canal del sensor y activación del relé de disparo</li> <li>• Un relé de disparo</li> </ul>
VAM 12L	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tres contactos selectivos de disparo para sensores dedicados</li> <li>• Conexión hasta con 10 sensores puntuales de arco</li> <li>• Supervisión continua de los sensores</li> <li>• Conexión al sensor de arco portátil</li> <li>• Indicación del canal del sensor y activación del relé de disparo</li> </ul>

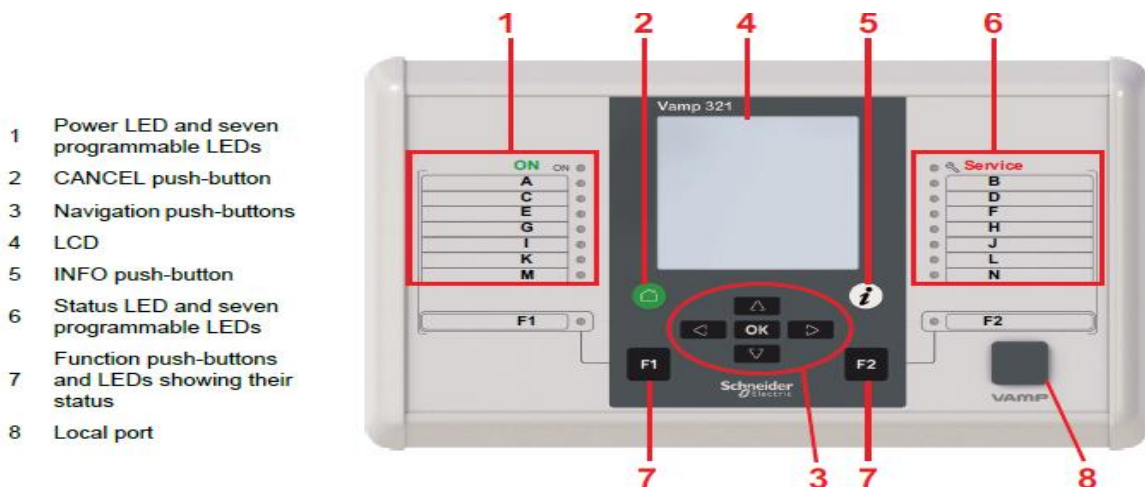
*Fig. 3.14 Tabla de características de los equipos de protección de arco VAMP.*

Señal	Descripción
IL1, IL2, IL3	Corrientes de fase
Io	Entrada de corriente residual
U12	Voltajes línea a línea
UL1	Voltaje línea a tierra
Uo	Voltaje de secuencia cero
F	Frecuencia
IoCalc	Sumatoria de fasores IL1 + IL2 + IL3
I1	Corriente de secuencia positiva
I2	Corriente de secuencia negativa
I2/I1	Corriente de secuencia negativa relativa
I2/In	Corriente de secuencia negativa en PU
IL	Media (IL1 + IL2 + IL3)/3
Uphase	Media de IL1, IL2, UL3
Uline	Media de U12, U23, U32
THDIL1	Distorsión de armónicos total de IL1
THDIL2	Distorsión de armónicos total de IL2
THDIL3	Distorsión de armónicos total de IL3
THDUa	Distorsión de armónicos total de entrada UA

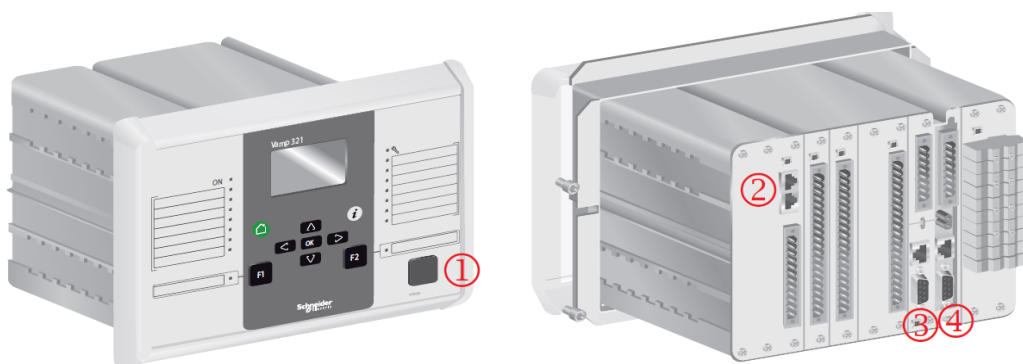
IL1RMS	IL1 RMS
IL2RMS	IL2 RMS
IL3RMS	IL3 RMS
ILmin, ILmax	Máximos y mínimos de corriente de fase
ILLmin, ILLmax	Máximos y mínimos de los voltajes de línea
ULNmin, ULNmax	Máximos y mínimos de los voltajes de fase
Ucomm	Voltaje de entrada Uo
Io1RMS	Corriente RMS de la entrada Io
VAI1, VAI2 ,VAI3, VAI4, VAI5	Entradas analógicas virtuales 1-5 (GOOSE)

*Fig. 3.15 Tabla de señales supervisadas para la programación de los equipos.*

Posee un registrador de eventos con fecha y hora, y registrador de perturbaciones el cual se usa para grabar todas las señales medibles como son corrientes, voltaje e información sobre las entradas digitales (DI) y salidas digitales (DO). El registrador se activa mediante la señal de activación de alguna protección o por una entrada digital, el registrador se cargan y se analizan con el programa VAMPSET.



*Fig. 3.16 HMI del VAMP 321.*



*Fig. 3.17 Puertos de comunicación y conectores del VAMP 321.*

El equipo contiene dos puertos de comunicaciones: un puerto USB para la conexión hacia las opciones del VAMPSET y herramientas de configuración y la interface I/O para arco, la cual establece la comunicación entre las unidad maestra y las esclavas. En la figura 3.4 se observa enumerado en 1 la interface USB para el VAMPSET, en el 2, la interface I/O de arco, la 3 y 4 son puertos seriales de interface.

## 4. Conclusiones

### 4.1 Resultados

Para la implementación del proyecto se utilizaran cuatro juegos de transformadores de corriente, dos para el gabinete de servicios propios de la unidad 1 y 2, y dos para los CCM's de las unidades 1 y 2. Los TC's de los servicios propios tienen características distintas al de los CCM, esto se debe a la carga total que manejan debido a que en los servicios propios se encuentran más circuitos conectados con cargas mayores.

Tipo	Encapsulado
Corriente Prim I-pn	2500 A
Corriente Sec I-sn	5 A
Frecuencia	60.0 Hz
Norma aplicad	IEC 60044-1
Clase	5P – 15
Carga nominal	30.0VA COS: 0.8
Tipo de núcleo	Protección CT

*Fig. 4.1 Tabla de características de los TC's.*

De acuerdo a la ley federal del trabajo el artículo 484 establece que todas las indemnizaciones toman como base al salario que perciba el trabajador al ocurrir el riesgo y los aumentos posteriores que correspondan al empleo que desempeñaba, hasta que se determine el grado de incapacidad, además en el artículo 487 se establece que los trabajadores tienen derecho a asistencia médica y quirúrgica, rehabilitación, hospitalización, medicamentos, aparatos de prótesis y la indemnización fijada [16].

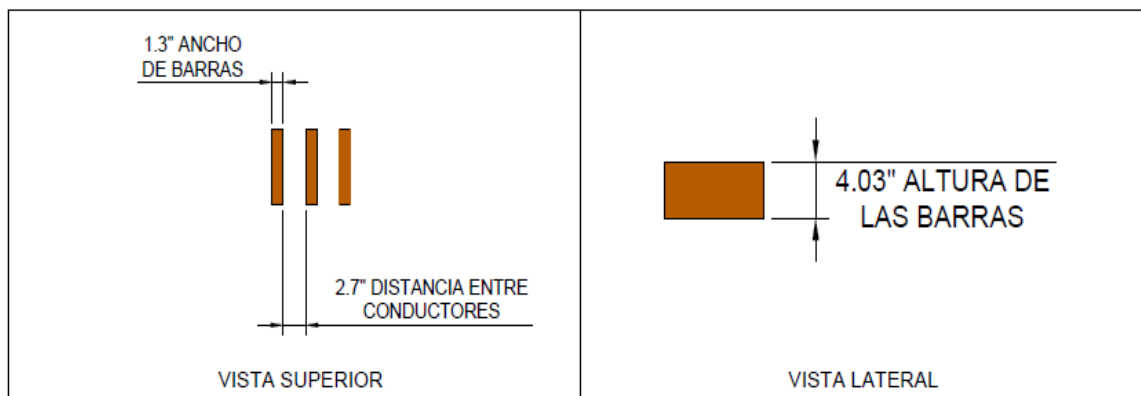
Si el accidente le produce al trabajador una incapacidad permanente total, la indemnización consistirá en una cantidad equivalente al importe de mil noventa y cinco días de salario. Cuando el accidente traiga como consecuencia la muerte del trabajador la indemnización comprenderá; dos meses de salario por gastos funerarios, un pago por la cantidad equivalente a cinco mil días de salario sin deducir la indemnización que percibió el trabajador por incapacidad temporal.

De acuerdo a las tablas del artículo 514, de evaluación de incapacidades permanentes se establece el porcentaje de indemnización de acuerdo al daño ocasionado por el accidente,

ya sea perdidas de miembros, perdida de movilidad por daño en articulaciones, trastornos en los miembros, rigidez y falta de movilidad, parálisis completas o incompletas por lesiones de nervios, daños en el rostro, ojos, oídos, etc.

Con la gestión de la suficiencia presupuestal para la implementación del proyecto como se ha solicitado, se tiene un monto aproximado de \$1, 000,000.00 M.N para su desarrollo en las unidades 1 y 2 de la central.

Dimensiones de barras de gabinete de servicios propios



Dimensiones de barras de CCM

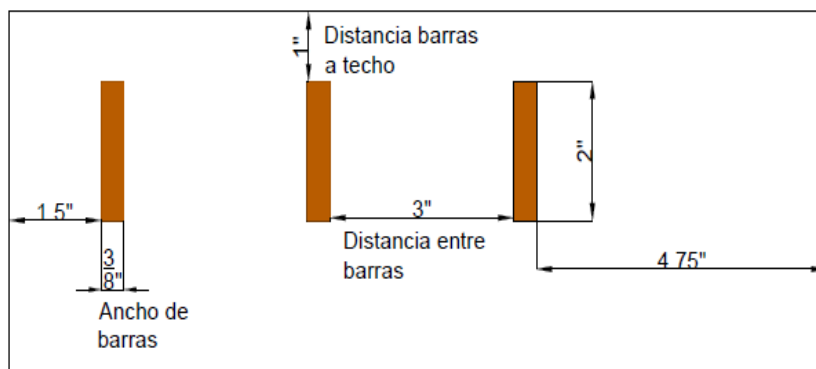
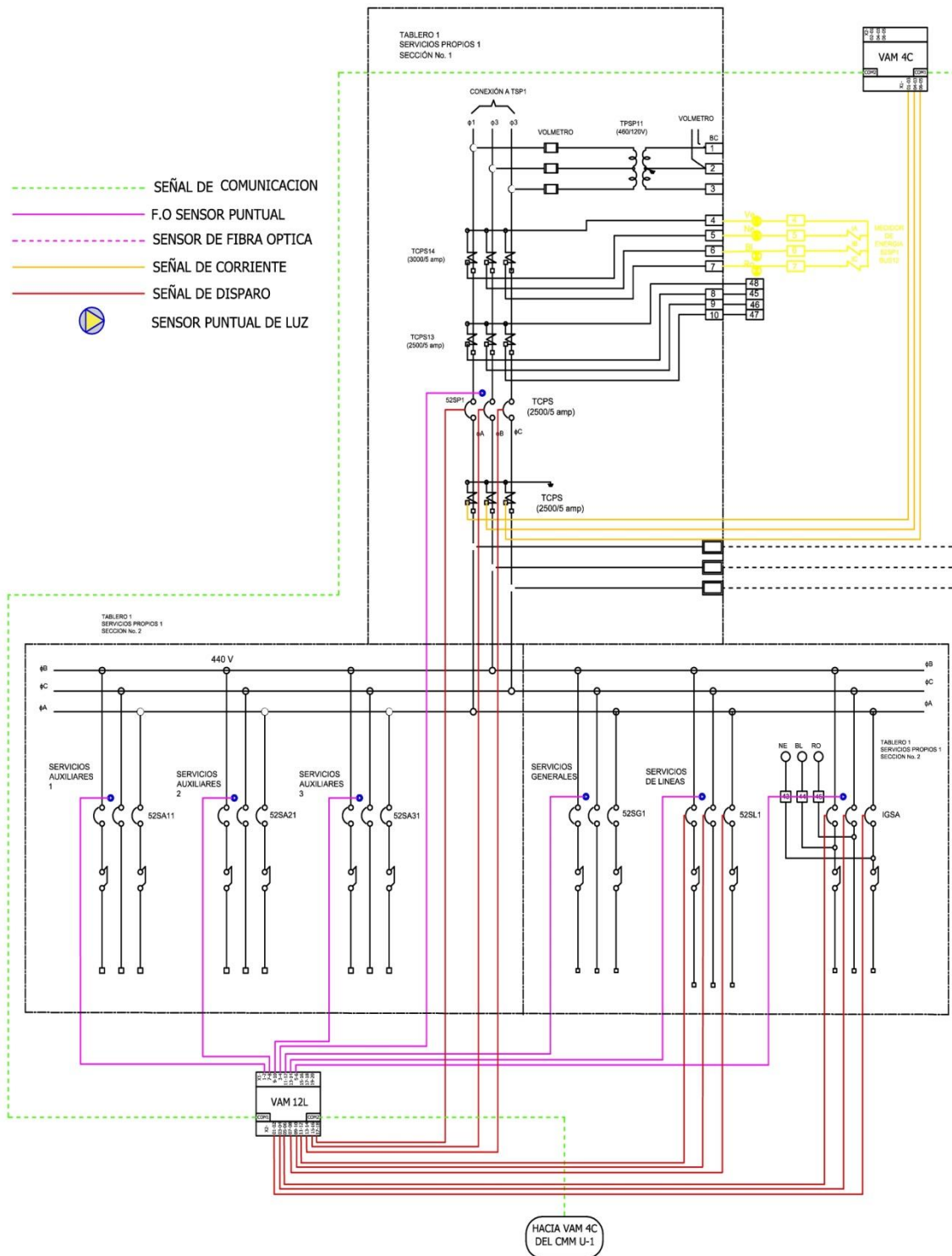
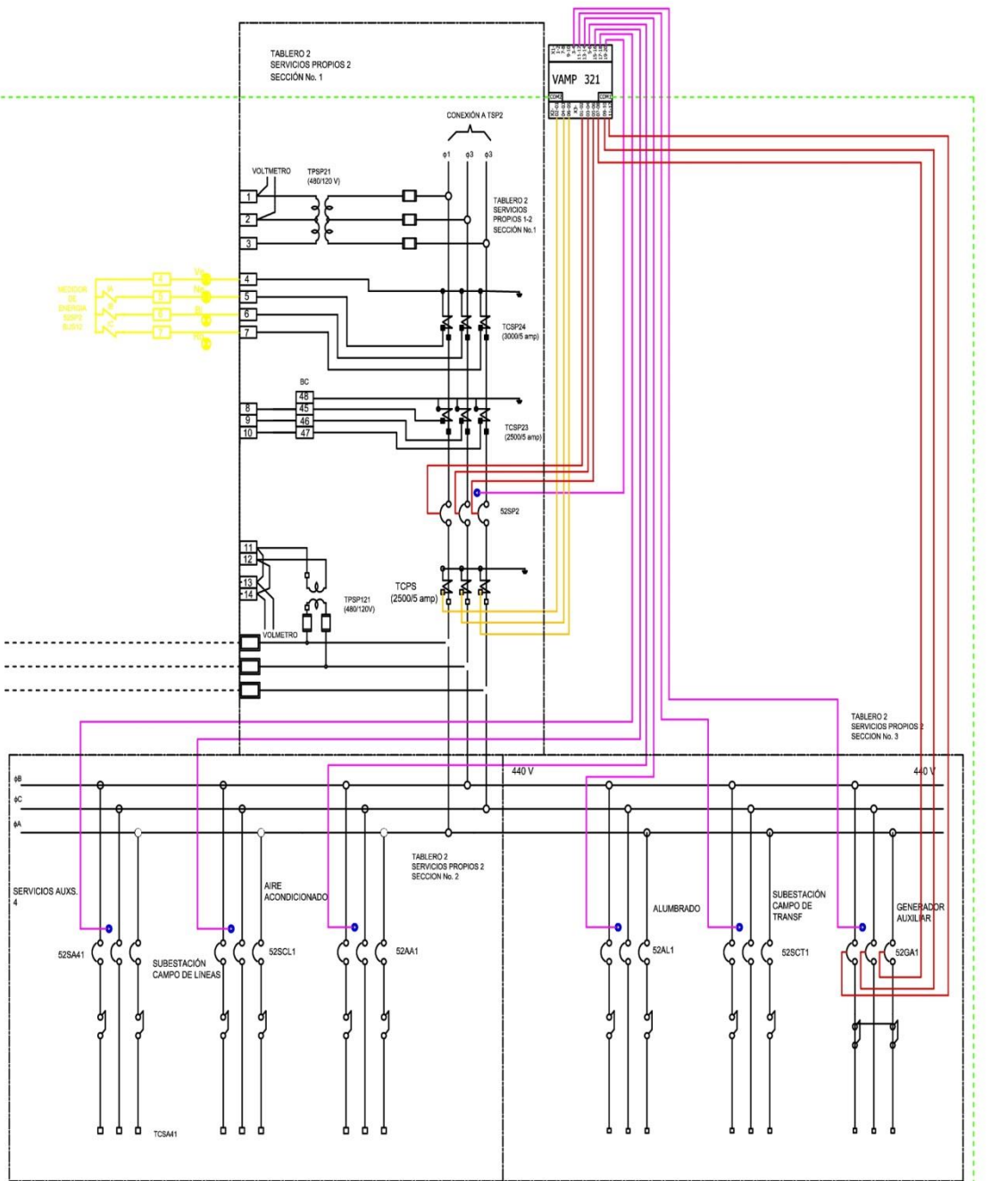


Fig. 4.2 Dimensiones de barras de bus servicios propios y CCM.



**Fig. 4.3** Diagrama trifilar de proyección del equipo VAMP en la unidad 1.

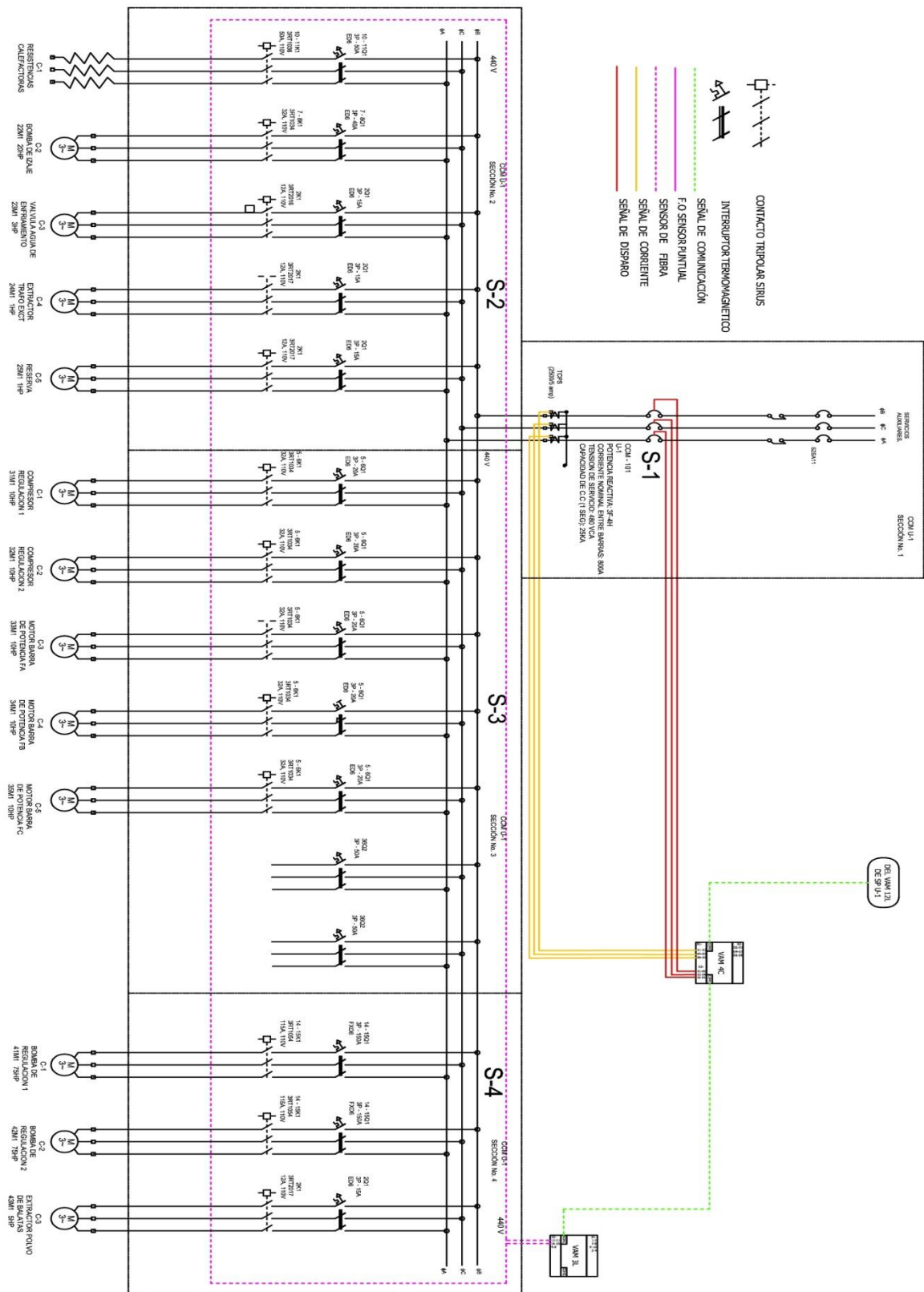


- 50 METROS DE DISTANCIA ENTRE UNIDADES VAMP 321 - VAM 4C ( SP U-1 CON SP U-2)
- 50 METROS DE DISTANCIA ENTRE VAM 12L - VAM 4C ( SP U1 CON CCM)
- 50 METROS DE DISTANCIA ENTRE VAMP 321 - VAM 4C ( SP U2 CON CCM)
- 1/2 METRO DE DISTANCIA ENTRE VAM 4C - VAM 12L ( SP U1 )
- 1/2 METRO DE DISTANCIA ENTRE VAM 4C - VAM 3L ( CCM U1 )
- 1/2 METRO DE DISTANCIA ENTRE VAM 4C - VAM 3L ( CCM U2 )

HACIA VAM 4C  
DEL CMM U-2

**Fig. 4.4** Diagrama trifilar de proyección del equipo VAMP en la unidad 2.





*Fig. 4.5 Diagrama trifilar de proyección del equipo VAMP en el CCM*

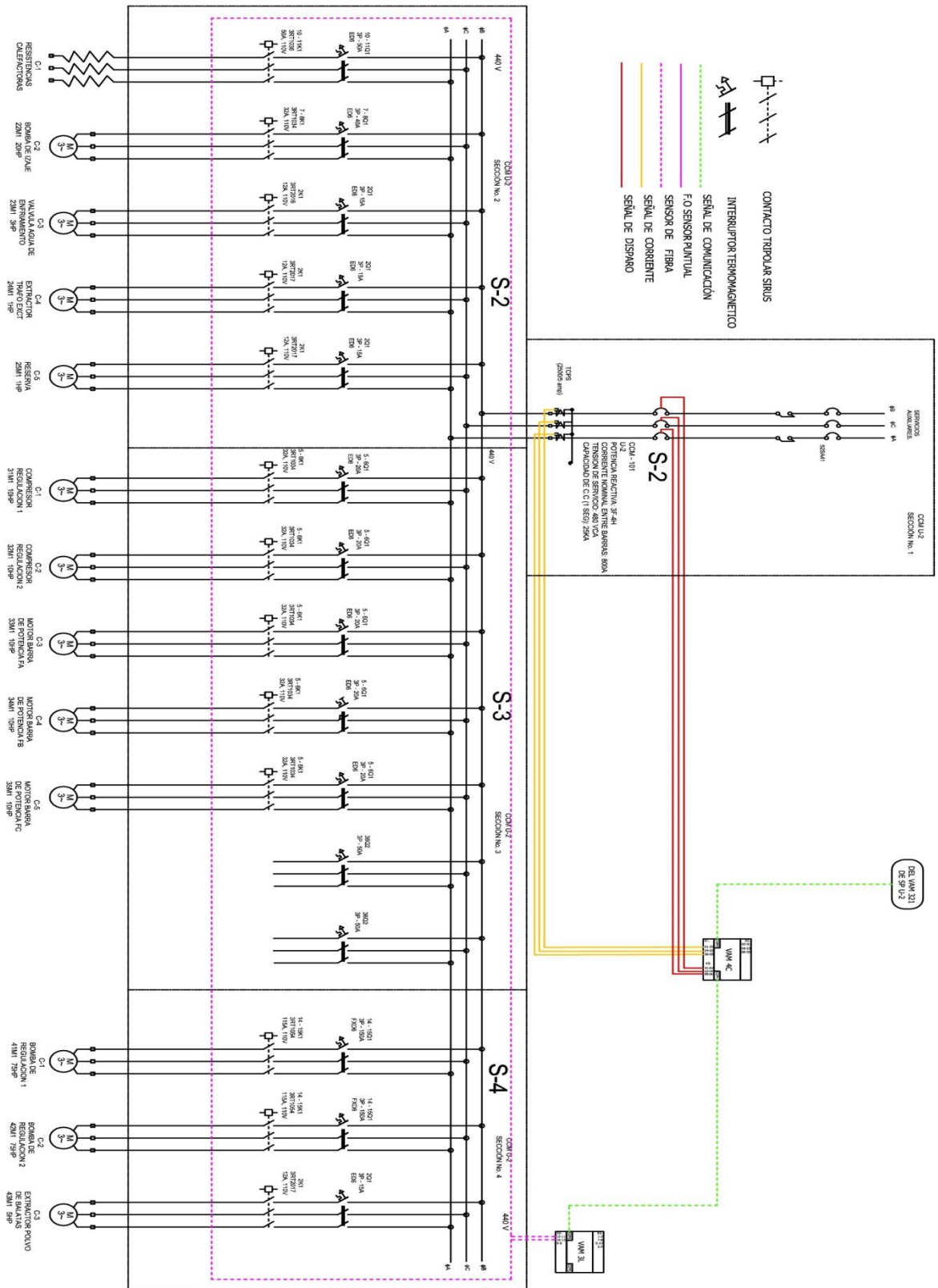


Fig. 4.6 Diagrama trifilar de proyección del equipo VAMP en EL CCM

## 4.2 Conclusiones

De acuerdo al sistema para detección y mitigación del fenómeno de arco eléctrico en tableros eléctricos de baja y media tensión, de acuerdo a la especificación CFE G0100-08, define las características técnicas, alcances, parámetros y protocolos de pruebas requeridos en los sistemas para detección y mitigación del fenómeno de arco eléctrico y su campo de aplicación para todos los tableros de baja y media tensión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Con la implementación de sistemas de protección contra arco eléctrico se reduce el tiempo de liberación de las fallas y con esto se reduce la energía potencial incidente en caso de este fenómeno, entre las ventajas que conlleva esto están el incremento de la seguridad del personal, reducción de los costos de reparación considerando el cambiar el equipo completo o cambiar solo una parte del sistema que lo compone.

Una falla en los servicios propios provocaría que todos los dispositivos de protección del bus en falla se abran para mitigar el daño, en este caso, si los servicios auxiliares de algún generador se interrumpe provocaría el paro de la máquina y con ello la interrupción del sistema de generación y producción de energía conllevando a pérdidas económicas importantes.

Con la implementación de este proyecto, se lograría bajar la energía incidente a niveles mínimos, asegurando la integridad de los equipos y del mismo personal en caso que exista una actividad mientras se encuentra energizado el equipo.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Ing. Jorge Luis Félix Anaya, Primer sistema de protección contra arcos eléctricos (SDMAE) implementado en centrales de la C.F.E, Junio 2011.
- [2] G. Idárraga Ospina, IEEE, D.Cubillos y L.Ibáñez “Analysis of arcing fault models.
- [3] G.A Hussain, M. Shafiq, M. Lehtonen “Predicting arc faults in distribution switchgears” Electric Power Engineering (EPE), 2016 17th International Scientific Conference.
- [4] Marcia L. Eblen, Tom A. Short, Wei-Jen Lee “Medium-Voltage Arc Flash Testing of Switchgear and Live-Front Transformers” IEEE Transactions on Industry Applications, volume pp, issue 99, August 2016
- [5] S.A Saleh, A. S. Aljankawey, R. Errouissi, M. A Rahman “Phase-Based Digital Protection for Arc Flash Faults” IEEE Transactions on Industry Applications, Page 2110-2121, January 2016. Abstracto:

- [6] John A. Kay, G. Amjad Hussain, Matti Lehtonen, Lauri Kumpulainen “New Preemptive Arc-Fault Detection Techniques in Medium-Voltage Switchgear and Motor Controls” IEEE Transactions on Industry Applications, page 740-750, August 2015.
- [7] Sotiria G. Koutoula, Igor V. Timonshkin, Martin D. Judd “A Study of Energy Partition During Arc Initiation” IEEE Transactions on Industry Applications, page 2137-2144, June 2016.
- [8] Lubomir Sevov, Marcelo Valdes “Considerations for differential protection in LV Buses” Pulp, Paper & Forest Industries Conference (PPFIC), 2016 IEEE, June 2016.
- [9] Bruce Land “The Behavior of Arcing Faults in Low-Voltage Switchboards” IEEE Transactions on Industry Applications, pages 437-444, March 2008.
- [10] Sistema para detección y mitigación del fenómeno de arco eléctrico en tablero eléctrico de baja y media tensión, Especificación C.F.E G0100-08, Agosto 2012.
- [11] Kay, J.A., Sullivan, P.B., Wactor, M., “Installation and application considerations of arc resistant medium voltage control equipment”. Paper No PCIC-2007-5, *IEEE PCIC Technical Conference*, 17-19 September, 2007.
- [12] Swencki, S.J, Smith, J.E., Roybal, D.D., Burns, D.B., Wetzel, G.E., Mohla, D.C., “Electrical safety, arc flash hazards, and “the standards” a comprehensive overview”, IEEE PCIC, September 12-14, 2005.
- [13] Jones, R.A., Liggett, D.P., Capelli-Schellpfeffer, M., Macalady, T., Saunders, L.F., Downey, R.E., McClung, B., Smith, A., Jamil, S., Saporita, V., “Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment”, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No 2, March/April 2000
- [14] Arvola, J., Vähämäki, O., “Integrated arc protection concept”, *Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 19-21, 2004.
- [15] Roberto J. Chávez Vega, “Sistema selectivo contra arco eléctrico”, IEEE.
- [16] Ley Federal del Trabajo, DOF 12-06-2015.

## Anexo A: Levantamiento de equipos en Servicios Propios

DATOS DE LAS ALIMENTACIONES DE LOS SERVICIOS PROPIOS DE LA C. H. MALPASO						CORRIENTE	IMPEDANCIA 100 MVA <sub>b</sub>
COD.	EQUIPOS	MVA	KV	X''d %	RPM	Inom (KA)	Z P.U
GEN1	GENERADOR U-1	218	15	18	128	8.3908	0.0826
GEN2	GENERADOR U-2	218	15	18	128	8.3908	0.0826
4030	ALIMENTACION EXTERNA	250	13.8	-	-	10.4592	0.4000
GA	GENERADOR AUXILIAR HIDRAULICO	1.5	0.46	18	-	1.8827	12.0000
IGSA	GENERADOR DIESEL	0.4375	0.48	18	-	0.5262	41.1429

Fig. A.1 Tabla de datos de generadores.

DATOS Y CÁLCULOS DE LOS TRANSFORMADORES DE LA C. H. MALPASO						CORRIENTE		IMPEDANCIA 100 MVA <sub>b</sub>
COD.	NOMBRES	KVA	H KV	L KV	Z%	Inom H (A)	Inom L (A)	Z P.U
TSL1	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS EXTERIORES 1 ETAPA	750	13.8	0.44	8	31.38	984.12	10.6667
TSP1	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-1	2000	15	0.44	6.1	76.98	2624.32	3.0500
TSP2	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-2	2000	15	0.44	7.52	76.98	2624.32	3.7600
TSP3	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-3	2000	15	0.44	5.65	76.98	2624.32	2.8250
TSP4	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-4	2000	15	0.44	6.04	76.98	2624.32	3.0200
TSL5	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS EXTERIORES 1 ETAPA	750	13.8	0.44	7.19	31.38	984.12	9.5867
TSP5	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-5	2000	15	0.44	6.1	76.98	2624.32	3.0500
TSP6	TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS U-6	2000	15	0.44	6.1	76.98	2624.32	3.0500

Fig. A.2 Tabla de datos de transformadores.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS DE SERVICIOS GENERALES DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVA <sub>b</sub>	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z	
ALUMBRADO TOTAL	-	1	440	140	106.6943	106.6943	-	
COMPRESOR	0.91	0.82	440	283	160.9367	215.6750	0.00776	
MOTOR 1	0.91	0.82	440	3	1.7060	2.2863	0.00008	
MOTOR 2	0.91	0.82	440	3	1.7060	2.2863	0.00008	
				<b>2.928</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0220</b>	<b>0.00792</b>	
							Z P.U	<b>126.2259</b>

*Fig. A.3* Tabla de equipos instalados en aire acondicionado y carga en alumbrado.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS DE SERVICIOS AUXILIARES DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVA <sub>b</sub>	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z	
JUEGO DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS	-	-	440	54.54	41.5651	0.0000	0.000000	
VENTILADOR DE PUENTE DE TIRISTORES	0.84	0.82	440	3.1	1.6273	2.3625	0.000085	
VENTILADOR DE PUENTE DE TIRISTORES	0.84	0.82	440	3.1	1.6273	2.3625	0.000085	
EXTRACTOR DE AIRE TRANFEXCI.	0.91	0.82	440	2	1.1374	1.5242	0.000055	
MOTOR EXTRAC. DE POLVO DE BALATAS	0.885	0.89	440	5.8	3.4816	4.4202	0.000159	
BOMBA DE REGULACION	0.91	0.82	440	58	32.9835	44.2019	0.001590	
BOMBA DE REGULACION	0.91	0.82	440	58	32.9835	44.2019	0.001590	
COMPRESOR DE SIST. DE REGULACION	0.895	0.83	440	12.5	7.0766	9.5263	0.000343	
COMPRESOR DE SIST. DE REGULACION	0.895	0.83	440	12.5	7.0766	9.5263	0.000343	
MOTOR DE ENFRIAMIENTO DE BUS DE FASE A	0.91	0.82	440	9.5	5.4025	7.2400	0.000260	
MOTOR DE ENFRIAMIENTO DE BUS DE FASE B	0.91	0.82	440	9.5	5.4025	7.2400	0.000260	
MOTOR DE ENFRIAMIENTO DE BUS DE FASE C	0.91	0.82	440	9.5	5.4025	7.2400	0.000260	
BOMBA DE IZAJE	0.91	0.82	440	14.5	8.2459	11.0505	0.000397	
EXTRACTOR DE CO2	0.91	0.82	440	4.5	2.5591	3.4295	0.000123	
				257.04	156.5711	154.3257	0.00555	
							Z P.U	180.1446

*Fig. A.4* Tabla de equipos instalados en servicios auxiliares 1, 2, 3 y 4.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS EN SCT DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVA <sub>b</sub>	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z P.U	
MOTOR DE VENTILADOR FA1	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA2	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA3	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA4	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA5	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA6	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA7	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FA8	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB1	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB2	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB3	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB4	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB5	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB6	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB7	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FB8	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC1	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC2	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC3	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC4	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC5	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC6	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC7	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
MOTOR DE VENTILADOR FC8	0.91	0.82	440	1	0.5687	0.7621	0.000027	
				24	13.6483	18.2905	0.000658	
							Z P.U	1519.9697



*Fig. A.5* Tabla de equipos instalados en SCT de las unidades 1, 2, 3 y 4, parte del SCT.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS DE SERVICIOS GENERALES DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVA b	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z	
MOTORES DE GRUA DE DESFOGUE 1	0.91	0.82	440	25	14.2170	19.0526	0.00069	
MOTORES DE GRUA DE DESFOGUE 2	0.91	0.82	440	35	19.9038	26.6736	0.00096	
MOTOR PRINCIPAL GRUA 1	0.91	0.82	440	7.5	4.2651	5.7158	0.00021	
MOTOR AUXILIAR 1 GRUA 1	0.91	0.82	440	5	2.8434	3.8105	0.00014	
MOTOR AUXILIAR 2 GRUA 1	0.91	0.82	440	12.5	7.1085	9.5263	0.00034	
MOTOR AUXILIAR 3 GRUA 1	0.91	0.82	440	27	15.3544	20.5768	0.00074	
MOTOR PRINCIPAL GRUA 2	0.91	0.82	440	7.5	4.2651	5.7158	0.00021	
MOTOR AUXILIAR 1 GRUA 2	0.91	0.82	440	5	2.8434	3.8105	0.00014	
MOTOR AUXILIAR 2 GRUA 2	0.91	0.82	440	12.5	7.1085	9.5263	0.00034	
MOTOR AUXILIAR 3 GRUA 2	0.91	0.82	440	27	15.3544	20.5768	0.00074	
BOMBAS DE ACHIQUE 1	0.91	0.82	440	114	64.8296	86.8797	0.00434	
BOMBAS DE ACHIQUE 2	0.91	0.82	440	125	71.0851	95.2628	0.00475	
BOMBAS DE ACHIQUE 3	0.91	0.82	440	146	83.0274	111.2669	0.00555	
COMPRESORES GENERALES 1	0.91	0.82	440	27.6	15.6956	21.0340	0.00076	
COMPRESORES GENERALES 2	0.91	0.82	440	27.6	15.6956	21.0340	0.00076	
MOTOR 1 DEL TORNO	0.91	0.82	440	20.3	11.5442	15.4707	0.00056	
ESMERIL MECANICO	0.91	0.82	240	8.8	2.7297	3.6581	0.00013	
TALADRO DE FUERZA 1	0.91	0.82	440	4.7	2.6728	3.5819	0.00013	
MOTOR 2 DEL TORNO	0.91	0.82	220	50	14.2170	19.0526	0.00069	
TALADRO DE FUERZA 2	0.91	0.82	440	2.9	1.6492	2.2101	0.00008	
SEPILLADORA	0.91	0.82	440	12.5	7.1085	9.5263	0.00034	
PRENSA	0.91	0.82	440	3	1.7060	2.2863	0.00008	
CIERRA ELECTRICA	0.91	0.82	440	13	7.3929	9.9073	0.00036	
MOTOR GENERAL	0.91	0.82	440	25	14.2170	19.0526	0.00069	
CARGADOR GENERAL , No 48 CD; MODELO: 48/75	-	-	440	8.5	6.4779	-	-	
CARGADOR ESTATICO No 2, 250 Vcd, BANCO No 1	-	-	440	8.5	6.4779	-	-	
CARGADOR ESTATICO No 2, 250 Vcd, BANCO No 1	-	-	440	8.5	6.4779	-	-	
MOTORES DE VENTILACION DE AIRE FORZADO 1	0.91	0.82	440	71	40.3763	54.1093	0.00270	
MOTORES DE VENTILACION DE AIRE FORZADO 2	0.91	0.82	440	71	40.3763	54.1093	0.00270	
MOTORES DE VENTILACION DE AIRE FORZADO 3	0.91	0.82	440	26.5	15.0700	20.1957	0.00073	
MOTORES DE VENTILACION DE AIRE FORZADO 4	0.91	0.82	440	32	18.1978	24.3873	0.00088	
					<b>970.4</b>	<b>540.2883</b>	<b>698.0095</b>	<b>0.03070</b>
							<b>Z P.U</b>	<b>32.5724</b>

*Fig. A.6* Tabla de equipos instalados en servicios generales.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS EN SCT DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVA b	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z P.U	
MOTOR DE VENTILADOR GOT1	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
MOTOR DE VENTILADOR GOT2	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
MOTOR DE VENTILADOR GOT3	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
MOTOR DE VENTILADOR GOT4	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
MOTOR DE VENTILADOR GOT5	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
MOTOR DE VENTILADOR GOT6	0.91	0.82	440	7.4	4.2082	5.6396	0.000203	
					<b>44.4</b>	<b>25.2494</b>	<b>33.8373</b>	<b>0.001217</b>
							<b>Z P.U</b>	<b>821.6052</b>

*Fig. A.7* Tabla de equipos instalados en grúa de obra de toma, parte del SCT.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS EN SCT DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVAb	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z.P.U	
MOTOR DE VENTILADOR OT1	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
MOTOR DE VENTILADOR OT2	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
MOTOR DE VENTILADOR OT3	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
MOTOR DE VENTILADOR OT4	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
MOTOR DE VENTILADOR OT5	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
MOTOR DE VENTILADOR OT6	0.91	0.82	440	25.5	14.5014	19.4336	0.000699	
				<b>153</b>	<b>87.0082</b>	<b>116.6017</b>	<b>0.004194</b>	
							Z.P.U	<b>238.4266</b>

*Fig. A.8* Tabla de equipos instalados en obra de toma, parte del SCT.

ANÁLISIS DE CARGAS INSTALADAS EN SCT DE LA C. H. MALPASO					CÁLCULO DE POTENCIAS		IMPEDANCIA 100 MVAb	
EQUIPOS	EFF	F.P	V	I	KW	KVA	Z.P.U	
MOTOR DE VENTILADOR FA1	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FA2	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FA3	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FA4	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FB1	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FB2	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FB3	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FB4	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FC1	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FC2	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FC3	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
MOTOR DE VENTILADOR FC4	0.91	0.82	440	4	2.2747	3.0484	0.000110	
				<b>48</b>	<b>27.2967</b>	<b>36.5809</b>	<b>0.001316</b>	
							Z.P.U	<b>759.9848</b>

*Fig. A.8* Tabla de equipos instalados en SCT de las unidades 5 y 6, parte del SCT.

#### Anexo B: Cálculo de arco eléctrico

Método	Parámetros de funcionamiento
Ralph Lee “ <i>The other Electrical Hazard: Electrical Arc Flash Burns</i> ”	Calcula la energía incidente y los límites de arco eléctrico en sistemas abiertos,
Doughty Neal Paper, “ <i>Predicting Incident Energy to Better Manage</i> ”	Calcula la energía incidente para sistemas trifásicos de 600V o menos, aplica corrientes de cortocircuito

<i>the Electrical Arc Hazard on 600V Power Distribution Systems</i>	entre 16kA y 50kA
IEEE 1584, “ <i>Guide for Performing Arc Flash Calculations</i> ”	Calcula la energía incidente y los límites de arco eléctrico para sistemas trifásicos entre los rasgos de; de 208V a 15kV; de 50Hz a 60Hz, de 0.7kA a 106kA de corriente de cortocircuito y con una distancia entre conductores de 13mm a 152mm.
Doan, “Arc Flash Calculations for Exposure to DC Systems”	Calcula la energía incidente para sistemas de corriente directa hasta 1000V DC.

**Fig. B.1** Tabla de métodos para el cálculo de arco eléctrico de acuerdo a NFPA 70E.

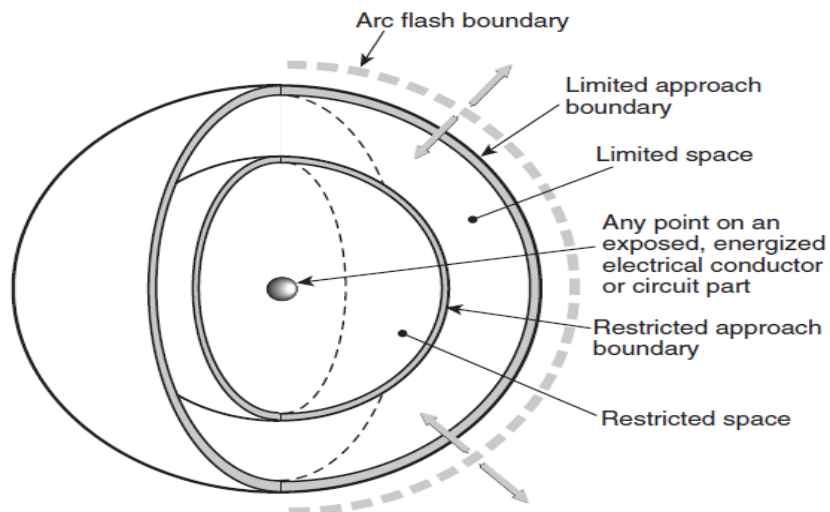
El método IEEE 1584-2002 estima la energía incidente y las barreras de protección contra arco eléctrico, se puede desarrollar de dos maneras, una formula empírica con sistemas trifásicos de; 208V a 15kV, de 50Hz a 60Hz, de 0.7kA a 106kA de corriente de cortocircuito y con una distancia entre conductores de 13mm a 152mm.

Voltaje del sistema (kV)	Tipo de equipo	Distancia típica entre conductores (mm)	Exponente “x” de distancia
0.208 - 1	Apertura en aire	10 – 40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCC’S y Tableros	25	1.641
	Cables	13	2.000
1 - 5	Apertura en aire	102	2.000
	Switchgear	13 - 102	0.973
	Cables	13	2.000
5 - 15	Apertura en aire	13 - 153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cables	13	2.000

**Fig. B.2** Tabla de exponentes y distancias entre conductores típicas de acuerdo al equipo usado y al voltaje empleado.

Clase de equipo	Distancia de trabajo típica (mm)
15kV Switchgear	910
5kV Switchgear	910
Switchgear de bajo voltaje	610
CCM’s y tableros de bajo voltaje	455
Cables	455

**Fig. B.3** Tabla de distancias típicas para diferentes áreas de trabajo.

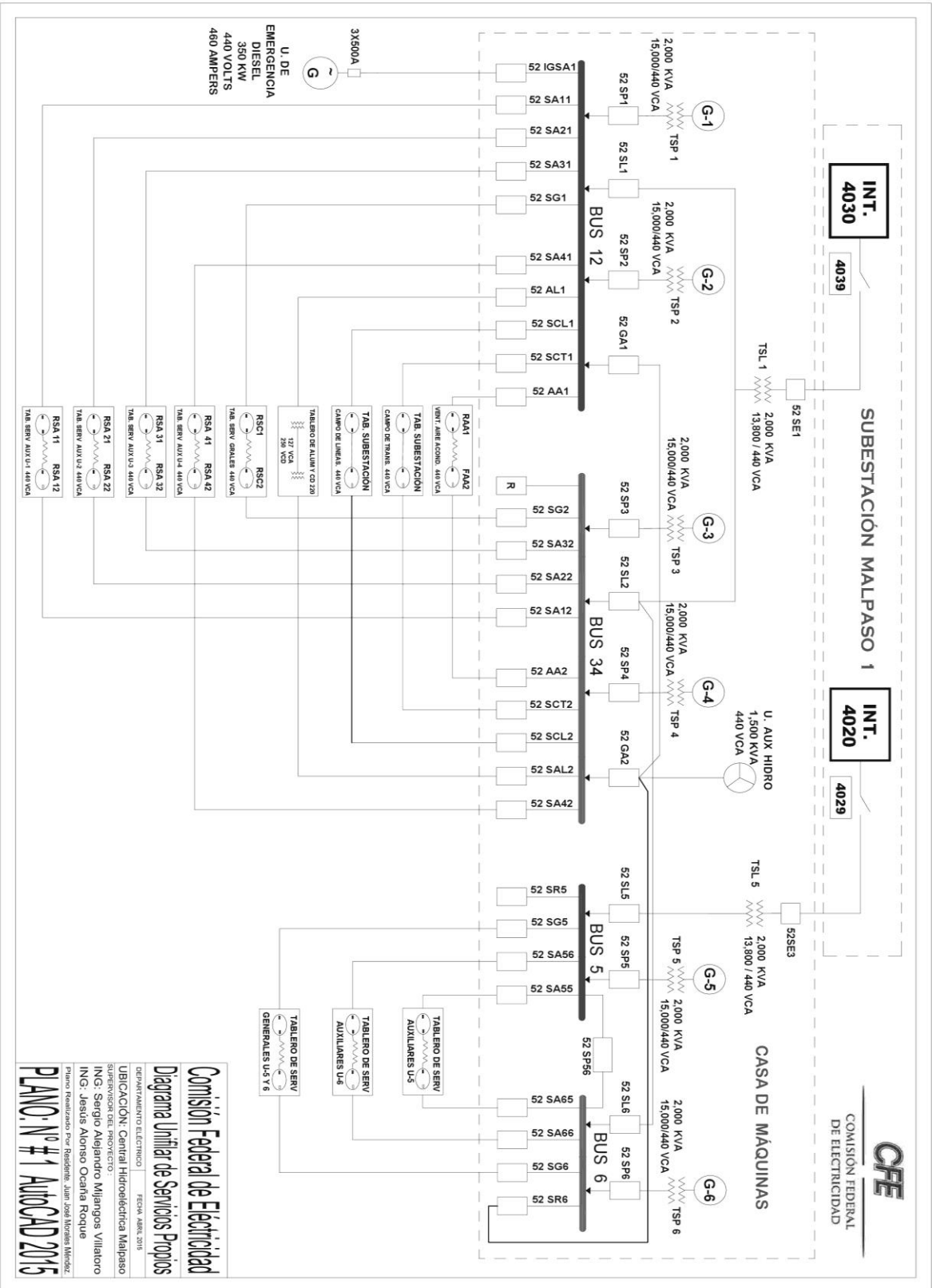


**Fig. B.4** Límites de aproximación en un arco NFPA 70E.

EPP necesario	Nivel de peligro	Nivel de incidencia <i>Cal/cm<sup>2</sup></i>
Camisa, guantes y pantalón FR (Retardante al fuego), puede ser de mezclilla, protección auditiva.	1	4
Ropa interior de algodón, camisa, guantes y pantalón FR, protección auditiva y lentes o careta para protección visual.	2	8
Ropa interior de algodón, camisa, pantalón, overoles FR y traje para arco eléctrico, protección auditiva y lentes o careta para protección visual.	3	25
Ropa interior de algodón, camisa, pantalón y overoles FR y traje multicapa para arco eléctrico, protección auditiva y lentes o careta para protección visual.	4	40

**Fig. B.5** Tabla de niveles de peligro de acuerdo a la energía incidente y el Equipo de Protección Personal necesario.

### Anexo C: Diagramas de la C.H Malpaso



*Fig. C.1 Diagrama unitario de los servicios propios de la Central Hidroeléctrica*