



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL

Abner Enmanuel García Yol

Asesorado por el Ing. Arturo Alejandro Cruz Castro

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA
ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ABNER ENMANUEL GARCÍA YOL

ASESORADA POR EL ING. ARTURO ALEJANDRO CRUZ CASTRO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADORA	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Adolfo René Hernández Hernández
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 29 de mayo de 2013


Abner Enmanuel García Yol

Guatemala, 25 de marzo de 2014

Ingeniero
Francisco Gonzales.
Coordinador Área de Potencia.
Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica.
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Estimado Ingeniero Francisco:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante ABNER ENMANUEL GARCÍA YOL. Carne 2000-18131, titulado: **“Evaluación de cortocircuito de un Sistema Eléctrico de Potencia Industrial”**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, considero que llena los requisitos para su aprobación final.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Cordialmente,

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”


Arturo Alejandro Cruz Castro
INGENIERO ELECTRICISTA
Col. No. 9331

Ing. Arturo Alejandro Cruz.

Ingeniero Electricista.

Colegiado No. 9331

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 31. 2014

Guatemala, 25 de marzo 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA
ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL, del estudiante Abner
Enmanuel García Yol, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia



STO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 31. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ABNER ENMANUEL GARCÍA YOL titulado: EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 14. DE JULIO 2,014.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 480.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE CORTOCIRCUITO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA INDUSTRIAL**, presentado por el estudiante universitario **Abner Enmanuel García Yol**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 18 de septiembre de 2014

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, la sabiduría, la fuerza y la perseverancia para poder alcanzar este triunfo, gracias de todo corazón.
- Mis padres** Ambrocio García y Tomasa Yol de García, a quienes amo profundamente, ejemplos incansables de honradez, rectitud, trabajo y determinación, por todos los sacrificios económicos que hicieron para brindarme la oportunidad de ser un ingeniero. Siempre estaré en deuda, pues gracias a ellos veo mi sueño hecho realidad. Este es mi humilde regalo por el amor y el apoyo que siempre me brindaron.
- Mi hermana** Mishell García, por su aprecio y comprensión ante mi persona, por cada momento vivido en esta casa de estudio.
- Mis hermanos** Omar, Emerson y Andrea García que mi esfuerzo y triunfo sea un ejemplo para que ellos puedan cumplir sus metas, los quiero mucho.
- Mis abuelas** Por sus sabios consejos, aprecio, cariño y ejemplo de fortaleza.

Mi novia

Gracias por su amor y cariño, comprensión y motivación brindada para culminar mi carrera.

Mi familia

Tíos y primos en general, por ser parte de mi vida.

Mis amigos

Arturo Cruz, Ángel Franco, Selvyn Velásquez, Cristian Fuentes, Pablo Noyola, Daniel Alvarado, Julio Montejo, Edgar Car, Tito Pérez, por ser una fuente de apoyo y amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San Carlos
De Guatemala**

Por haberme abierto sus puertas encontrar el conocimiento que hoy tengo y por todas las experiencias que viví y nunca olvidaré, mi alma máter.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos académicos e intelectuales para lograr ser un ingeniero electricista y poseer una carrera tan completa.

Mi asesor

Arturo Alejandro Cruz, por todo su apoyo incondicional, por haber transmitido sus conocimientos y por ser un gran amigo dando a comprender que el aprender es para enseñar y compartir con todos los demás.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. PROTECCIONES PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.....	1
1.1. Generalidades del sistema eléctrico industrial.....	1
1.2. Criterios de protección.....	1
1.3. Aplicación de fusibles	2
1.3.1. Clasificación de los fusibles.....	4
1.3.1.1. Capacidad interruptiva.....	5
1.3.1.2. Por el tipo de operación.....	7
1.3.1.3. Por la velocidad de operación	13
1.3.2. Curvas características de los fusibles	15
1.3.2.1. Tiempo-corriente	15
1.3.2.2. Curva de corriente pico permisible	17
1.3.2.3. Curva de energía de fusión I^2t	18
1.4. Relevadores de protección	19
1.4.1. Por el tiempo de operación.....	21
1.4.2. Por la construcción.....	21
1.5. Interruptores termo magnéticos y electromagnéticos	27

2.	CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO	31
2.1.	Clasificación de las fallas eléctricas industriales	31
2.1.1.	Por la causa	34
2.1.2.	Por la conexión	35
2.1.3.	Sistema de valores por unidad (P.U.)	37
2.1.4.	Cambio de base para los valores por unidad.....	39
2.2.	Sistema de la compañía suministradora	45
3.	COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.....	47
3.1.	Coordinación fusible-relevador.....	48
3.2.	Coordinación relevador-fusible.....	52
3.3.	Coordinación fusible-fusible	53
3.4.	Coordinación fusible-interruptor	54
3.5.	Coordinación relevador-relevador	54
4.	CASO DE ESTUDIO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL	57
4.1.	Cálculo de las corrientes trifásicas del sistema industrial.....	57
4.2.	Programa de simulación NEPLAN, sistema de planeamiento y optimización de redes eléctricas, como herramienta de ayuda	78
4.2.1.	Módulo de cortocircuito NEPLAN.....	78
4.3.	Análisis del caso de estudio	81
4.4.	Comparación de resultados	84
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema básico de un fusible	3
2.	Clasificación general de los fusibles.....	5
3.	Fusible de expulsión simple.....	8
4.	Fusible de expulsión de triple disparo	9
5.	Fusible de vacío	9
6.	Fusible limitador de corriente	10
7.	Fusible de potencia	11
8.	Fusibles SF6	12
9.	Fusible de acción rápida	13
10.	Fusible de acción retardada	14
11.	Fusibles extremadamente rápidos	14
12.	Curva de tiempo-corriente.....	16
13.	Curva de corriente pico permisible	17
14.	Esquema básico de un relevador de protección	19
15.	Relevador de atracción electromagnética	22
16.	Relevador de inducción electromagnética.....	23
17.	Esquema de un relevador de sobrecorriente estático	24
18.	Esquema de un relevador de sobrecorriente digital	25
19.	Relevador de sobrecorriente digital.....	25
20.	Curvas de fusibles inversa, muy inversa y extremadamente inversa ...	26
21.	Esquema básico de un interruptor termo magnético	27
22.	Esquema de un interruptor electromagnético.....	28
23.	Interruptores electromagnéticos industriales.....	29

24.	Tipo de fallas	35
25.	Diagrama de fallas	36
26.	Curva de coordinación del relevador-fusible	50
27.	Aplicación de factores K_T y K_p a curva TMF	51
28.	Coordinación de relevador-fusible	52
29.	Coordinación de fusible-fusible	53
30.	Coordinación de fusible-interruptor	55
31.	Coordinación de relevador-relevador	55
32.	Diagrama Unifilar del sistema industrial	58
33.	Diagrama Unifilar equivalente de impedancias por unidad	62
34.	Equivalente de la Barra-3 a Barra-2	63
35.	Equivalente de la Barra-4 a Barra-2	64
36.	Equivalente de la Barra-5 a Barra-2	65
37.	Equivalente de la Barra-7 a Barra-6	66
38.	Equivalente de la Barra-6 a Barra-2	66
39.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 1	67
40.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 2	69
41.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 3	70
42.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 4	72
43.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 5	73
44.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 6	75
45.	Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 7	77
46.	Arranque del programa NEPLAN	79
47.	Módulo de cortocircuito NEPLAN	79
48.	Selección de red automática NEPLAN	81
49.	Unifilar del sistema industrial hecho en NEPLAN	82
50.	Cálculo de cortocircuito a barras del sistema industrial	83
51.	Resultado de cortocircuito a barras del sistema industrial	83

TABLAS

I.	Valores de tensión y corriente de los fusibles	6
II.	Tipos de fusibles más utilizados y los valores de corriente.....	7
III.	Clases de fusibles y las respectivas energías de fusión	18
IV.	Tipos y causas de fallas.....	34
V.	Probabilidades de incidencia de fallas	37
VI.	Datos del equipo del sistema industrial.....	57
VII.	Datos de resultados obtenidos de simulación NEPLAN.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AT	Alta tensión
BT	Baja tensión
CC	Corriente de cortocircuito
Inom.	Corriente nominal
Ip	Corriente primaria
Is	Corriente secundaria
F	Falla
Z	Impedancia
ZL	Impedancia de línea
P	Potencia activa
PCC	Potencia de cortocircuito
Q	Potencia reactiva
XL	Reactancia inductiva
R	Resistencia
Unom	Tensión nominal
p.u.	Valores por unidad

GLOSARIO

Cortocircuito	Es el aumento exponencial de la corriente al existir una falla a tierra, siendo la máxima corriente que circule por la red por donde pase.
Coordinación de protecciones	Determinación de la secuencia y tiempos de operación de las protecciones para despejar de forma eficiente una falla, disminuyendo sus efectos y evitando riesgos operativos para el sistema.
Falla	Condición que impide continuar la operación de uno o más componentes de un sistema que requiere la rápida acción de los esquemas de protecciones para no dañar a los equipos.
Líneas de transmisión	Es el enlace físico entre dos subestaciones usado para el transporte de potencia eléctrica entre ellas.
Sobretensión	Fluctuación de voltaje que incrementa el valor nominal.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se analizaron las corrientes de cortocircuito para un sistema eléctrico industrial, con los resultados obtenidos por medio de los cálculos realizados se puede determinar el tamaño y tipos de dispositivos de protección que puedan utilizar en el sistema industrial, para detectar y mitigar las fallas.

Con el avance de la tecnología y lo complejo de los sistemas eléctricos de potencia, surge la necesidad de ser cada vez más exigentes y precisos con los tiempos de respuesta de los dispositivos de protección que tienen como función principal proteger a las personas y en segundo lugar a los equipos e infraestructura.

En el capítulo 1, se mencionan de manera conceptual las protecciones utilizadas en un sistema eléctrico de potencia, así como dispositivos, tales como fusibles, clasificación, relevadores y curvas de funcionamiento de funcionamiento de los mismos.

En el capítulo 2, consiste en determinar las causas de las fallas del sistema eléctrico de potencia que se presentan más frecuente, tipo de conexiones y causas, como valores por unidad y cambio de base.

En el capítulo 3, trata sobre las diferentes coordinaciones de dispositivos eléctricos de protección como los fusibles-relevadores, fusible-fusible, fusible-interruptor y relevador-relevador.

En el capítulo 4, comprende los cálculos de cortocircuito de un sistema eléctrico industrial aplicando el programa NEPLAN al circuito equivalente de Thevenin, con lo que permite saber la magnitud de estas corrientes y saber qué tipo y tamaño de dispositivo es necesario utilizar para manipular y drenar las fallas.

OBJETIVOS

General:

Efectuar una evaluación de cortocircuito de un sistema eléctrico de potencia industrial.

Específicos:

1. Explicar los fundamentos de las protecciones para un sistema eléctrico industrial.
2. Determinar el cálculo de corto circuito de un sistema eléctrico industrial.
3. Determinar los diferentes métodos de la coordinación de protecciones para un sistema eléctrico industrial.
4. Analizar el caso de estudio de un sistema eléctrico industrial, calculando las corrientes trifásicas del sistema industrial aplicando el programa NEPLAN al circuito equivalente de Thévenin.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de cortocircuito de un sistema eléctrico industrial, por el tamaño y complejidad es de suma importancia el estudio, aplicando técnicas de análisis empleadas en los sistemas eléctricos de potencia, que se pueden aplicar de igual manera a las instalaciones industriales.

Para realizar un análisis de coordinación de protecciones es necesario primero realizar el cálculo de cortocircuito en el sistema eléctrico industrial que se va a analizar, debido que por medio de este cálculo se puede determinar las corrientes que ocasionan los esfuerzos físicos y térmicos a los que son sometidos todos los elementos que lo conforman, y de esta manera dimensionar los equipos de protecciones necesario para el sistema eléctrico industrial. Una falla eléctrica en un sistema eléctrico de potencia no es más que la alteración y/o interrupción del funcionamiento normal en el flujo de potencia.

Con los datos obtenidos del cálculo de cortocircuito, aplicando el método equivalente de Thévenin, brinda información importante para hacer un buen análisis del sistema de protecciones, utilizando el programa NEPLAN como respaldo para comparar los resultados obtenidos de los cálculos matemáticos del equivalente de Thévenin.

1. PROTECCIONES PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL

1.1. Generalidades del sistema eléctrico industrial

Considerando la importancia de un sistema eléctrico en la industria es de suma importancia tomar en cuenta la coordinación de protecciones eléctricas, debido a que cualquier dispositivo eléctrico puede fallar es algo inesperable poner en funcionamiento un sistema eléctrico de potencia, sin tener una coordinación de protecciones adecuada. Considerando que las condiciones anormales originan cambios en las magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia, respecto a los parámetros permisibles de operación. La falla de cortocircuito encierra un considerable aumento de la corriente y una caída de tensión.

1.2. Criterios de protección

En circunstancias anormales de operación cuando se presenta una falla se debe proteger el sistema eléctrico de cortocircuito o sobrecargas. Un cortocircuito se puede generar en distintas formas:

- Fallas mecánicas en el equipo
- Fallas de aislamiento
- Fallas en el equipo por sobrecargas excesivas y repetitivas, etc.

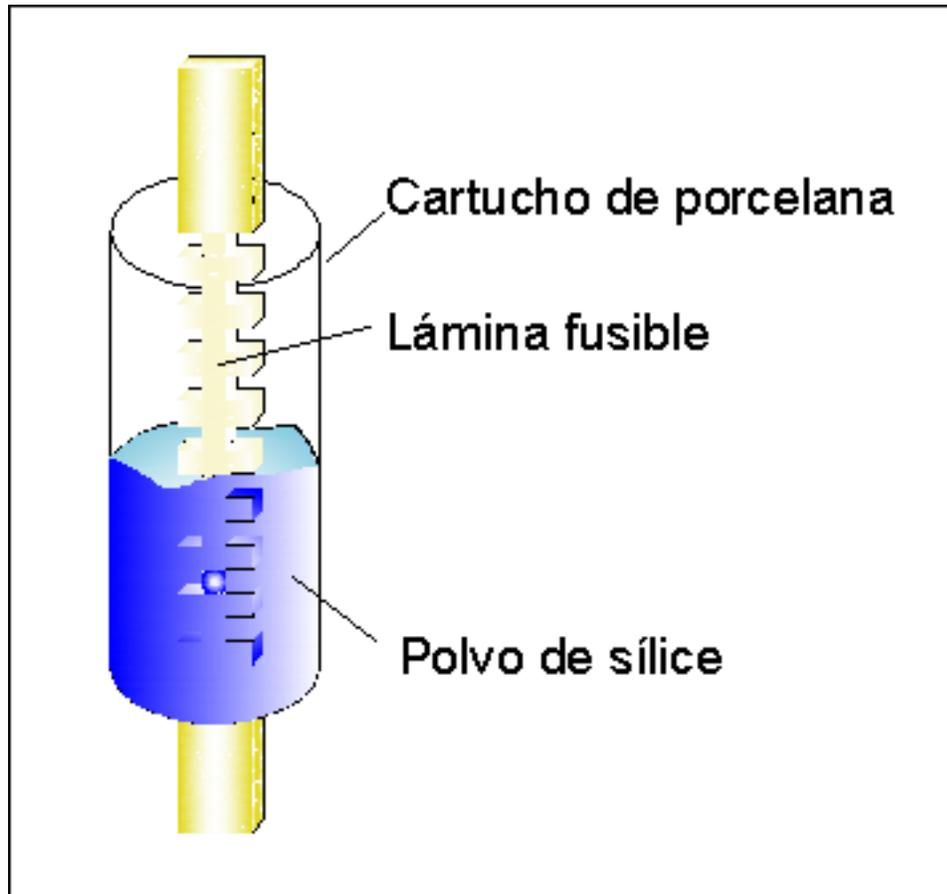
A diferencia de los cortocircuitos las sobrecargas se pueden presentar por:

- Operación incorrecta del equipo
- Instalaciones inapropiadas
- Arranque frecuente de motores
- Periodos largos de arranque de motores

1.3. Aplicación de fusibles

Un fusible es un dispositivo que se emplea para proteger un circuito eléctrico mediante el efecto de la fusión de uno o varios fusibles, el propósito es interrumpir el flujo de la corriente eléctrica cuando esta excede el valor de la corriente de fusión del fusible dentro un intervalo de tiempo. Las partes que conforman un fusible se muestra en la figura 1. El fusible es el elemento de protección utilizado para la desconexión en caso de una falla de cortocircuito, este se funde al paso de una magnitud de corriente superior para la cual fue diseñado.

Figura 1. Esquema básico de un fusible



Fuente: <http://upload.wikimedia.org>. Consulta: noviembre de 2014.

Los fusibles pueden dividirse en dos clases:

- Los de temperatura de fusión baja, hechos de estaño que son fundidos a 232 °C, el fusible de estaño puede transportar mayor cantidad de corriente continuamente dentro del incremento de temperatura permisible a diferencia de los fusibles de plata o cobre.
- Los de temperatura de fusión alta hechos de plata o cobre que son fundidos a 960 °C y 1 080 °C respectivamente.

Ambos fusibles con curvas similares de tiempo-corriente.

Un fusible se determina por el tipo de curva que se desea obtener, además de las características físicas, mecánicas y constructivas es de suma importancia determinar los parámetros eléctricos que identifican a estos dispositivos de protección. Debe cumplir con la Norma ANSI C37, los fusibles se identifican por las siguientes características:

- Tensión eléctrica nominal
- Corriente eléctrica nominal
- Frecuencia
- Nivel básico de impulso
- Respuesta de operación (curva tiempo-corriente)
- Velocidad de respuesta
- Capacidad interruptiva
- Servicio (interior o intemperie)

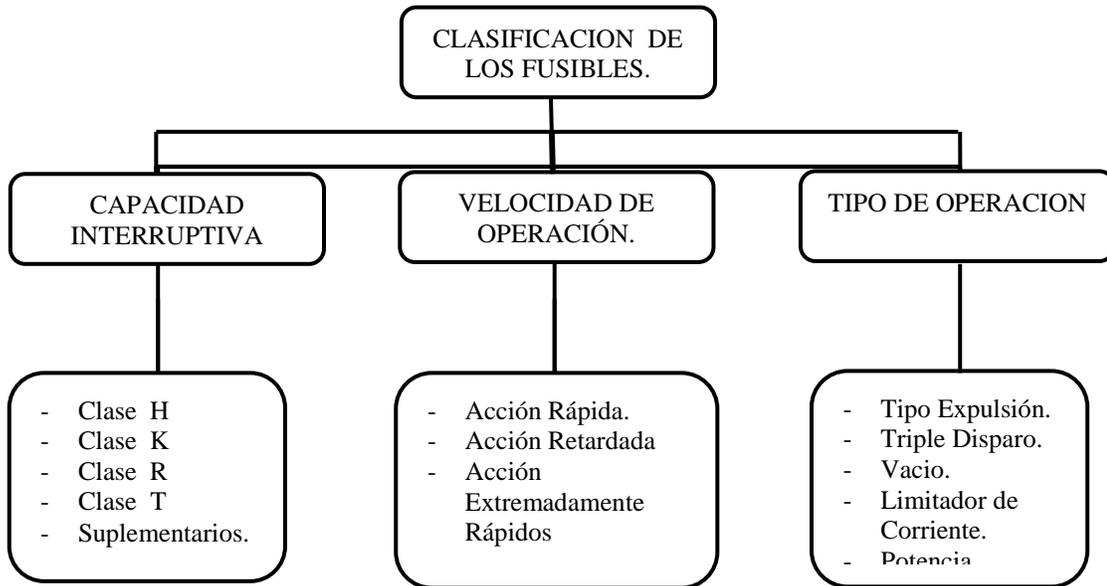
Factores que influyen en la aplicación de un fusible.

- Corriente de cortocircuito en el punto de instalación.
- Curva de daño de los elementos a proteger (conductores, transformadores, etc.).
- Relación X/R de la impedancia equivalente (Z_e).
- Costo.

1.3.1. Clasificación de los fusibles.

A continuación se puede apreciar en la figura 2. Como se clasifican los fusibles por capacidad interruptiva, velocidad de operación y tipo de operación.

Figura 2. **Clasificación general de los fusibles**



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas/site/cap4/c4protecsobrecarga.php>. Consulta: noviembre de 2013.

1.3.1.1. **Capacidad interruptiva**

Actualmente existe una amplia gama de fusibles, dependiendo de para qué tipo de aplicación se requiera, tomando en cuenta las especificaciones técnicas establecidas por el fabricante. Considerando las características de operación se describen algunos tipos de fusibles.

- Tipo N: la norma establece que debe de llegar al 100 % de la corriente nominal continuamente y debe fundirse en un rango de no menos de 230 % de la corriente nominal en 5 minutos.
- Tipo K y T: la características de estos fusibles se determina por tres rangos diferentes de tiempo de 0,1 s, 10 s, y 300 s, este tipo de fusible

sería capaz de llevar el 150 % de la capacidad nominal continuamente para fusibles de estaño y del 100 % para fusibles de plata.

Con base en estos estudios se normalizaron las corrientes que se consideran las más utilizadas comercialmente por los usuarios. Estas son:

1A, 2A, 3A, 5A, 8A, 15A, 25A, 40A, 65A, 100A, 140A y 200A.

Para las corrientes de cortocircuito en niveles de distribución de energía se tienen normalizadas las siguientes corrientes en función del nivel de tensión, con fusibles tipo expulsión.

Tabla I. **Valores de tensión y corriente de los fusibles**

Tensión en KV	Corriente de interrupción en Amperios
4.8	12,500
7.2	12,500
14.4	10,000
25	8,000

Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas/site/cap4/c4protecsobrecarga.php>. Consulta: noviembre de 2013.

La capacidad interruptiva de un fusible es la intensidad de corriente máxima que puede soportar el fusible para proteger los componentes eléctricos.

De acuerdo a la capacidad interruptiva los fusibles se clasifican de la siguiente manera:

Tabla II. **Tipos de fusibles más utilizados y los valores de corriente**

Fusible	Capacidad interruptiva en KA
Clase H	10
Clase K	50, 100 o 200
Clase RK-1 y RK-5	200
Clase J, CC, T y L	200
Clase G	100
Tipo tapón	10

Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas/site/cap4/c4protecsobrecarga.php>. Consulta: noviembre de 2013.

1.3.1.2. Por el tipo de operación

Se clasifican en tipo expulsión, triple disparo, vacío, limitador de corriente y potencia.

- Fusibles tipo expulsión: son aquellos fusibles que están destinados para proteger los transformadores de distribución en tensiones de 75, 50, 25 y 15 kv. Para corrientes nominales de 200 y 100 A. Entre las partes principales se encuentran las siguientes partes:
 - Aislador de porcelana
 - Contactos interiores
 - Muñón de bronce de alta resistencia
 - Perno de giro
 - Conector de ranuras paralelas
 - Contactos superiores

- Ganchos de sujeción
- Cuerpo de fusible
- Unión bisagra
- Férulas
- Gatillo

Figura 3. **Fusible de expulsión simple**



Fuente: fusiblesimple.jpg. Consulta: noviembre de 2013.

- Fusible de doble y triple disparo: es aquel formado por dos o tres corta fusibles por fase los cuales están unidos por medio de una barra común que actúan cuando la corriente llega a un valor máximo del mínimo permitido por los elementos a fundirse.

Figura 4. **Fusible de expulsión de triple disparo**



Fuente: fusibletriple.png. Consulta: noviembre de 2013.

- Fusible de vacío: están formados por un elemento fusible encerrado en una cámara al vacío y aislamiento cerámico, el cual se vaporiza cuando la corriente llega a un valor determinado, generándose un arco el cual se extingue por la diferencia de presión comparada con el vacío.

Figura 5. **Fusible de vacío**



Fuente: fusivacio.png. Consulta: noviembre de 2013.

- Fusible limitador de corriente: limitan la corriente cuando esta llega a un valor determinado. Son dispositivos de no expulsión, los cuales se funden por módulos cuando circula una sobrecorriente, provocando una sobretensión de arco, la cual eleva la temperatura para fundir el elemento metálico, llegando la corriente hasta cero cuando el arco se extingue completamente.

Figura 6. **Fusible limitador de corriente**



Fuente: Fusiblelimitadorcorriente.png. Consulta: noviembre de 2013.

- Respaldo o intervalo parcial: estos dispositivos deben actuar conjuntamente con un fusible de expulsión, debido a que la capacidad interruptiva esta generalmente de 500 A para arriba.
- Propósito general: están diseñados para operar con todo tipo de corriente, pero dependiendo del nivel de corriente, así es la velocidad de operación. Por ejemplo para corrientes bajas actúa de manera lenta y para corrientes altas como las de falla actúa rápido a una velocidad aproximada de un cuarto de ciclo.

- Intervalo completo: estos dispositivos tienen la capacidad de interrumpir cualquier tipo de corriente que sea superior a la nominal.
- Fusibles de potencia: son aquellos que tienen un mecanismo capaz de extinguir un arco por corto circuito de gran magnitud. Como por ejemplo en las subestaciones y líneas de transmisión. Existen dos tipos de fusibles de potencia los de expulsión y ácido bórico. Los primeros fueron los pioneros y con los cuales se empezó a trabajar bajo requerimientos mayores de corrientes de corto circuito, con las exigencias de la extinción del arco, pero debido a las mismas exigencias estos evolucionaron dando origen a los de ácido bórico. A continuación se detallan las ventajas que tienen estos sobre los de expulsión:
 - Para iguales dimensiones de cámara de extinción los de ácido bórico pueden manejar tensiones mal altas.
 - Puede trabajar un intervalo de corriente más grande
 - Tienen la capacidad de generar un arco eléctrico de menor energía
 - Reduce la emisión de gases y flama

Figura 7. **Fusible de potencia**



Fuente: Fusiblepotencia.png. Consulta: noviembre de 2013.

- Fusibles de hexafloruro de azufre (SF6): son empleados en circuitos de potencia por la capacidad para extinguir el arco eléctrico generado por sobretensiones de carga y falla. Este gas se contiene en una cámara en donde se extingue el arco. El SF6 tiene dos propiedades principales las cuales son dieléctricas y extintoras del arco. Este gas debe de estar a una temperatura mayor a la atmosférica para que opere de una manera eficaz, ya que la presión varía directamente proporcional con las características dieléctricas y extintoras.

Estos dispositivos se construyen para trabajar con tensiones del orden de 15kv, 27kv y 38kv y con capacidades de 200A a 600A nominales. Para 15kv y 27kv tienen una capacidad interruptiva de 20kA y para 38kv de 13.5kA.

Figura 8. **Fusibles SF6**



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas/site/cap4/c4protecsobrecarga.php>. Consulta: noviembre de 2013.

1.3.1.3. Por la velocidad de operación

Los fusibles por la velocidad de operación se clasifican en rápidos, extremadamente rápidos y de acción retardada.

- Acción rápida: estos tienen un tiempo de operaciones del orden de 0,05 s a 2 s, también se les llama de operaciones normal, porque no tiene ningún diseño intencional para modificar estos tiempos de operación. Se emplean en aplicaciones de protección de circuitos no inductivos como iluminación incandescente y cargas de baja potencia resistivas.

Figura 9. Fusible de acción rápida



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas/site/cap4/c4protectsobrecarga.php>. Consulta: noviembre de 2013.

- Acción retardada: se emplean para sobrecargas y con corrientes mayores actúan como un excelente limitador de corriente en el orden de menos de medio ciclo. Los fusibles de clase CC, G, H, J, RK5 y RK1 son de acción retardada identificados como (*time delay*), (td) o (d).

Figura 10. **Fusible de acción retardada**



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas>.

Consulta: noviembre de 2013.

- Extremadamente rápidos: son empleados para proteger circuitos sensibles como de electrónica de potencia, (diodos, tiristores, tarjetas electrónicas etc.) la función principal es de actuar con corrientes bajas de sobrecarga y corto circuito

Figura 11. **Fusibles extremadamente rápidos**



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas>.

Consulta: noviembre de 2013.

1.3.2. Curvas características de los fusibles

En el estudio de la coordinación de protecciones de un sistema eléctrico es necesario conocer las curvas características de los dispositivos de protección a utilizarse, para saber cuál es el tiempo de respuesta y que liberen las sobrecargas y fallas en el sistema de una manera adecuada es decir liberando el ramal con problema para no interrumpir el suministro eléctrico en partes que no tengan que ver con el punto de incidencia de falla. Esto para aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico. Otro punto importante es coordinar bien todos los dispositivos para que no se entorpezca la función de cada uno de ellos y disparen de manera descoordinada.

Existen tres tipos de curvas que se deben conocer, las cuales usan y recomiendan los fabricantes.

- Curva tiempo-corriente
- Curva de corriente pico permisible
- Curva de energía de fusión $I^2 t$

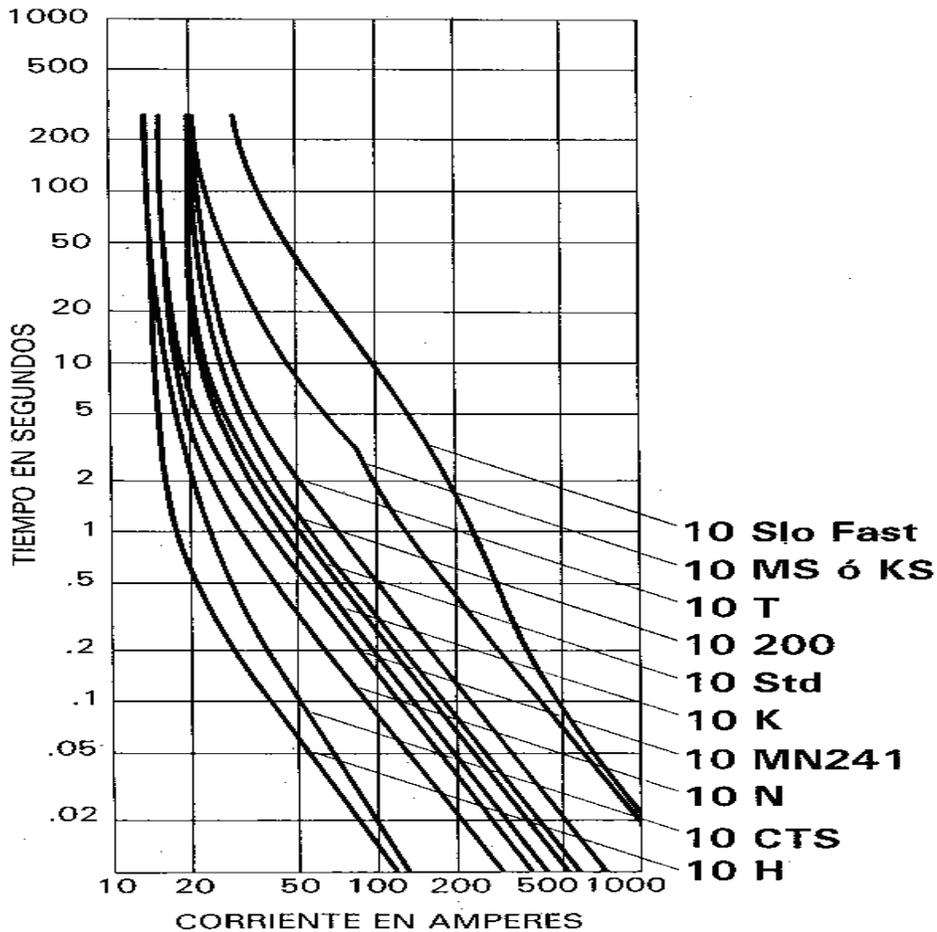
1.3.2.1. Tiempo-corriente

Esta curva representa la velocidad a la cual el elemento fusible se funde al pasar una corriente de determinado valor, esta va a depender de que curva sea por ejemplo de 30A, 60A etc. Los factores que influyen en el tiempo de fundición son los siguientes:

- La correcta aleación de los materiales que conforman el elemento fusible
- La pureza del metal
- La geometría del fusible por ejemplo (espesor y ancho)

Para estimar la velocidad o pendiente a la cual se funde el elemento fusible, se debe tomar en cuenta a nivel gráfico una banda en vez de una curva porque al momento de la fusión hay una variación de +/- 10%. Las curvas tiempo-corriente especifican el tiempo total que tarda un fusible en fundirse y liberar la falla a una tensión nominal. El tiempo de arqueo es de aproximadamente de 0.5 ciclos a 2 ciclos.

Figura 12. **Curva de tiempo-corriente**



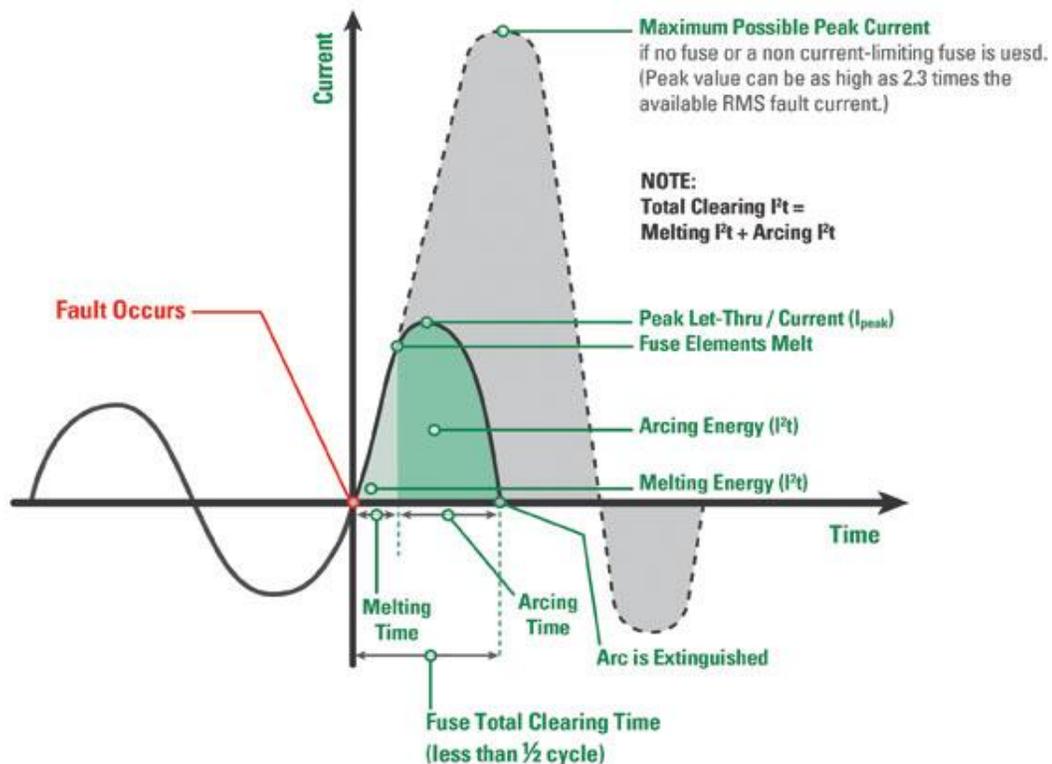
Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas>.

Consulta: noviembre de 2013.

1.3.2.2. Curva de corriente pico permisible

Estas curvas sirven para ver y analizar gráficamente en qué punto el fusible deja de conducir la corriente de falla y abre el circuito. Los dispositivos que se encuentran en la red eléctrica necesitan de protección ante corrientes de falla y los fusibles, son los dispositivos de protección que tienen la habilidad de responder de una manera rápida para limitar esa corriente.

Figura 13. Curva de corriente pico permisible



Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispod/redselectricas>.

Consulta: noviembre de 2013.

1.3.2.3. Curva de energía de fusión I^2t

Estas curvas muestran la cantidad de energía necesaria para fundir el elemento fusible y la energía para extinguir el arco eléctrico. En la curva se muestran los detalles de esta gráfica. Los datos de energía permisible I^2t se muestran a continuación:

Tabla III. Clases de fusibles y las respectivas energías de fusión

Clase	Capacidad(A)	I_p (KA)	$I^2 t$ (A ² /s)
J	30	7.5	7K
	60	10	30K
	100	14	80K
	200	20	300K
	400	30	1100K
	600	45	2500K
K1	30	10	10K
	60	12	40K
	100	16	100K
	200	22	400K
	400	35	1200K
	600	50	3000K
K5	30	11	50K
	60	21	200K
	100	25	500K
	200	40	1600K
	400	60	5000K
	600	80	10000K

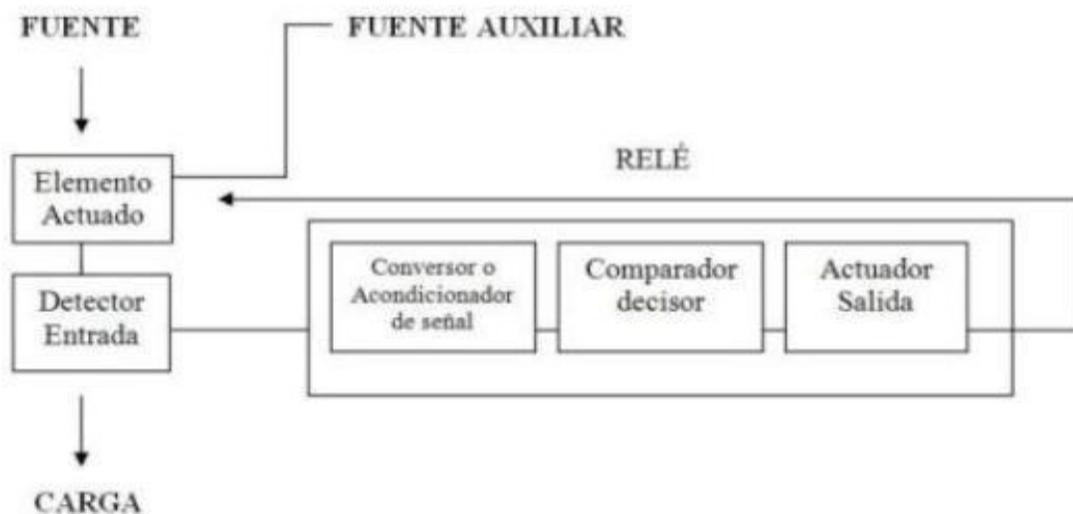
Fuente: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/redeelectricas/site/cap2/c2equipos25.php>. Consulta: noviembre de 2013.

1.4. Relevadores de protección

Son dispositivos encargados de automatizar las protecciones en los circuitos eléctricos, por ejemplo, son dispositivos que comparan una señal de entrada con una señal de ajuste, cuando la señal de entrada es mayor a la de ajuste, este tiene la capacidad de abrir o cerrar contactos auxiliares para abrir interruptores y sacar el ramal con problema del sistema.

El esquema básico de un relevador de protección se muestra a continuación:

Figura 14. Esquema básico de un relevador de protección



Fuente: <http://www.aa2000.com.a>. Consulta: noviembre de 2013.

- Dispositivo de entrada: es un transformador de corriente o voltaje, encargado de separar el lado de alto voltaje donde procede la falla y el lado de baja con lo cual provee un valor moderado y seguro para que trabajen los relevadores

- Dispositivo convertidor: se encarga de convertir la señal procedente del dispositivo de entrada a valores manejables para el dispositivo de medición.
- Dispositivo de medición: es el encargado de tomar la señal procedente del dispositivo de entrada o convertidor y compararla con una señal de ajuste que tiene grabada. Si la señal de entrada es más grande que la de ajuste el envía la señal para disparar las protecciones, es el dispositivo más importante del relevador de protección porque decide si hay disparo o no.
- Dispositivo de salida: cuando la señal es enviada por el dispositivo de medición es necesario un dispositivo que amplifique estas señales de voltaje para enviarla a los actuadores que abrirán el circuito
- Dispositivo accionador: es la bobina que es accionada por la señal de salida para accionar el disyuntor y así abrir el circuito de incidencia de falla.

Los relevadores de sobrecorriente se clasifican de la siguiente manera, lo cual se describe en los siguientes subtítulos.

- Por las características de tiempo-corriente:
 - Tiempo definido
 - Tiempo inverso
 - Tiempo muy inverso
 - Tiempo extremadamente inverso

- Por el nivel de corriente y forma de conexión:
 - Relevadores de sobrecorriente de fase
 - Relevadores de sobrecorriente de neutro
 - Relevadores trifásicos

1.4.1. Por el tiempo de operación

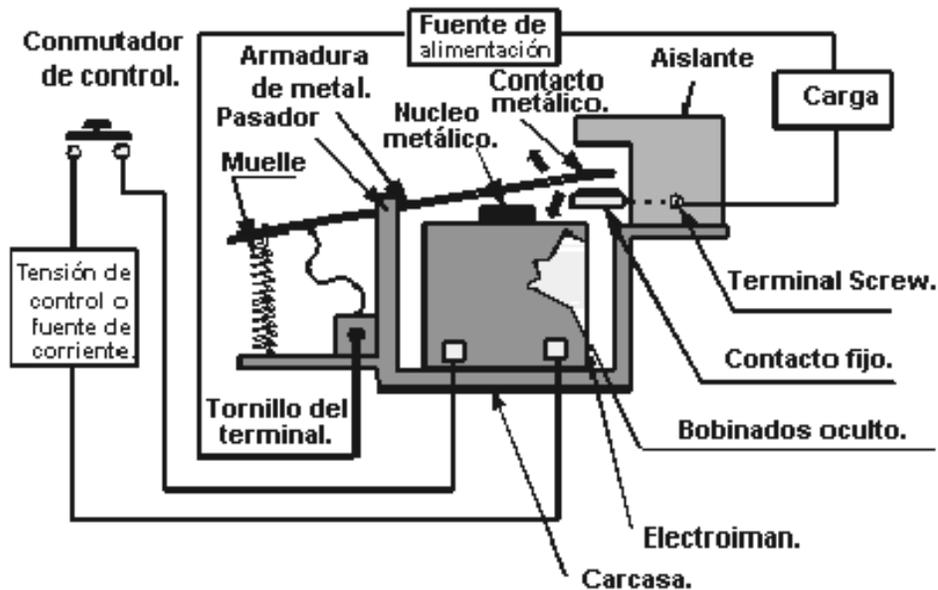
- Relevadores de sobrecorriente instantáneos (50): es un relevador que da una respuesta instantánea ante un valor de ajuste de corriente, con una velocidad menor a 3 ciclos (0,05s). Por esta velocidad de respuesta no deben de conectarse en serie, porque sería un desperdicio que varios actúen al mismo tiempo y se entorpezcan entre si la coordinación.
- Relevadores de sobrecorriente con retardo de tiempo (51): es un relevador con una respuesta retardada según las gráficas de tipo inverso o definida en relación a un valor de ajuste. El tiempo inverso significa que a mayor corriente de falla mayor velocidad en tiempo de repuesta y a menor corriente mayor tiempo de respuesta.

1.4.2. Por la construcción

- Relevador electromecánico: se clasifican según la funcionamiento en:
 - Atracción electromagnética: estos relevadores se utilizan en la construcción de relevadores de sobrecorriente instantáneos (50). Cuando se produce una falla, los transformadores de corriente le mandan una señal eléctrica a una bobina que se magnetiza, la cual hace accionar por medio del campo magnético del entrehierro un

embolo, el cual sirve para apertura o cierre de interruptores de circuitos de incidencia de falla.

Figura 15. Relevador de atracción electromagnética

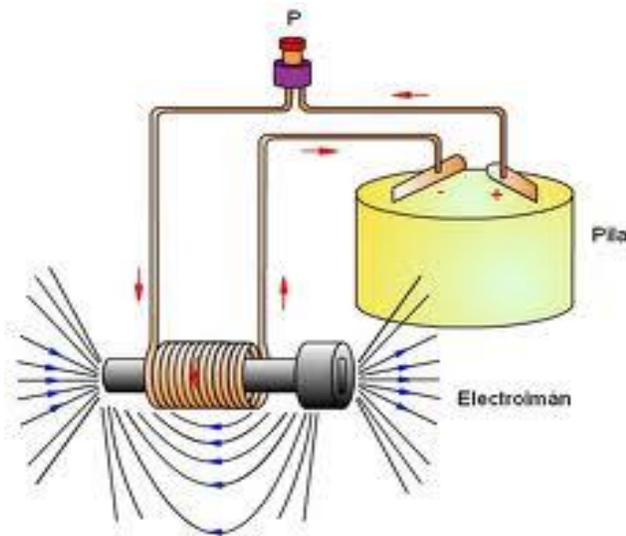


Fuente: <http://www.profesormolina.com.ar>. Consulta: noviembre de 2013.

- Inducción electromagnética: el relevador de sobrecorriente de inducción, actúa como un motor, magnetizando un entrehierro que genera un movimiento en un disco. El ajuste de distancia entre estas partes es lo que modifica el tiempo de respuesta con el que actúa el relevador. Generalmente estos dispositivos tienen una serie de tapas, que controlan la corriente del secundario en el transformador de corriente que gobierna la señal con la que funcionan los relevadores se tiene que tener especial cuidado de no graduar un valor mayor a 5 A para protección de los relevadores.

Finalmente se considera a un relevador electromecánico como un dispositivo que tiene una serie de graduaciones mecánicas en la tapa, que funciona en relación a una familia de curvas tiempo-corriente proporcionada por el fabricante.

Figura 16. **Relevador de inducción electromagnética**

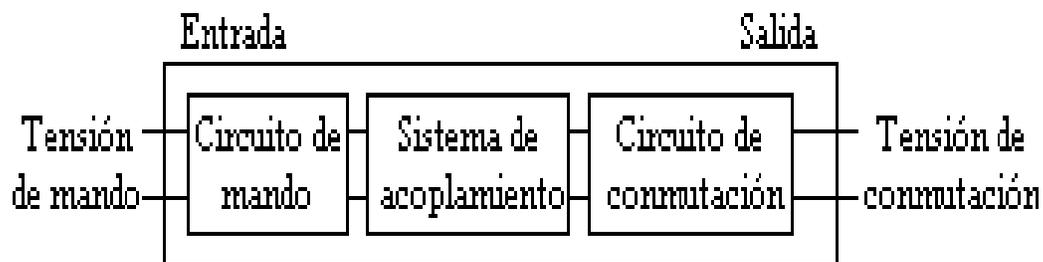


Fuente: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com>. Consulta: noviembre de 2013.

- Relevadores de sobrecorriente estáticos: estos relevadores poseen un funcionamiento similar a los electromecánicos con una diferencia que no poseen partes móviles, los factores como ajuste y operación son similares a los primeros mencionados. Las partes del esquema básico del circuito del relevador estático se definen a continuación:
 - Rectificador: encargado de convertir una señal eléctrica de corriente alterna a una corriente directa para que pueda ser manipulada en medición y control.

- Detector de nivel: es el que compara una señal analógica de entrada con una de ajuste para generar una señal de salida que dará la orden de disparo.
- Temporizadores: son los encargados de regular la curva con la cual será procesada la señal analógica de entrada (Familias de curvas del relevador).

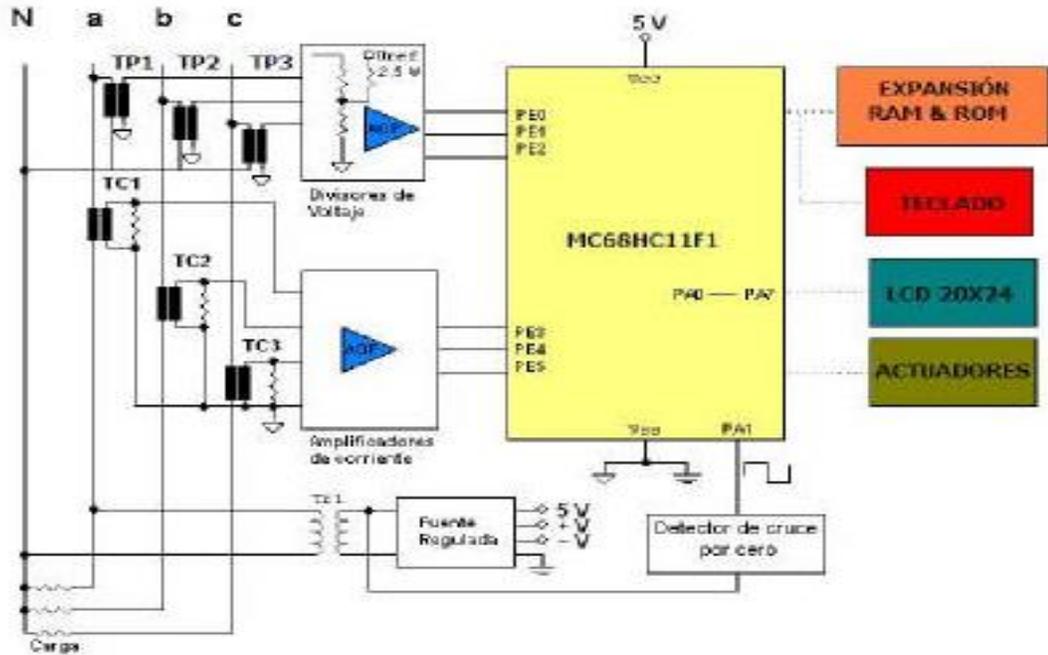
Figura 17. **Esquema de un relevador de sobrecorriente estático**



Fuente: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com>. Consulta: noviembre de 2013.

- Relevadores de sobrecorriente digitales o microprocesadores: este tipo de relevadores es el resultado de la evolución de los primeros relevadores, los cuales se fueron haciendo cada vez más inteligentes con el dominio de la automatización. Estos dispositivos además de cumplir la función de protección, también efectúan otras funciones como medición, control, detección de fallas, registro de eventos, oscilogramas. Es a través de comparaciones numéricas que realizan los microprocesadores que se puede desplegar esta información en computadores, luces piloto etc. Por esta misma tecnología los dispositivos trifásicos poseen dimensiones relativamente pequeñas, reduciendo el espacio en los tableros de control, medición y protección. A continuación se muestra el esquema general de un relevador de sobrecorriente digital:

Figura 18. Esquema de un relevador de sobrecorriente digital



Fuente: <http://cesar-men2a.tripod.com>. Consulta: noviembre de 2013.

Figura 19. Relevador de sobrecorriente digital

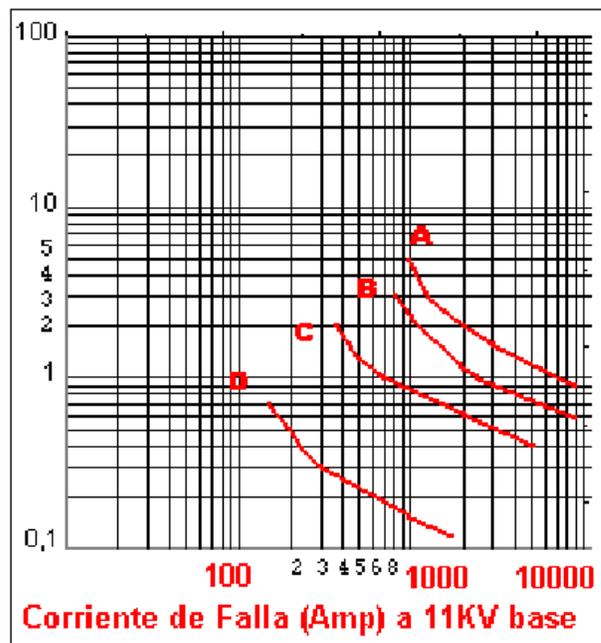


Fuente: <http://img.alibaba.com>. Consulta: noviembre de 2013.

Estos relevadores se constituyen de las siguientes partes: unidad de entrada analógica (corriente), unidades de entradas digitales, filtros, fuentes de alimentación, microprocesadores para funciones de medición, memoria RAM para registro de eventos, memoria EEPROM para grabar ajustes, unidades de salida, contactos de disparo y alarma, puertos de comunicación, pantalla, teclado, leds para señalización de banderas, piloto de encendido y unidad de auto diagnóstico y monitoreo.

Las curvas características con las cuales funcionan los relevadores digitales son las inverso, muy inverso y extremadamente inverso las cuales están grabadas en el microprocesador y este actúa según el valor grabado de ajuste.

Figura 20. **Curvas de fusibles inversa, muy inversa y extremadamente inversa**



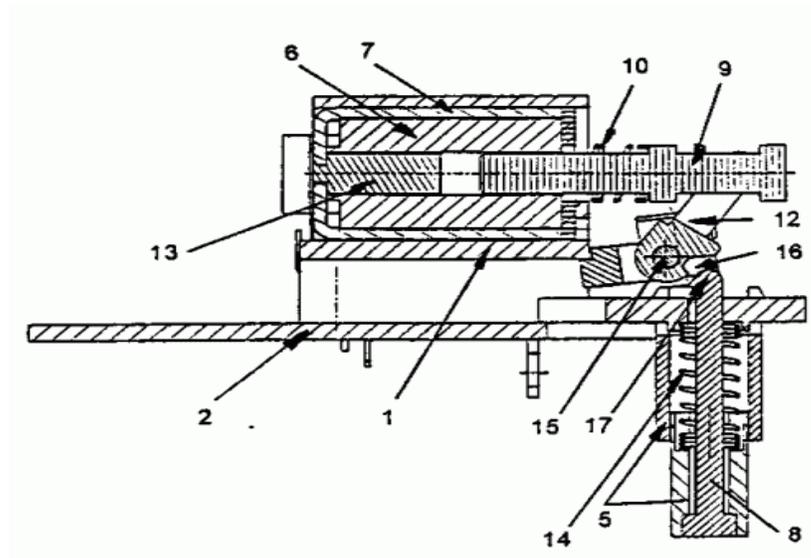
Fuente: <http://electricista2005.galeon.com>. Consulta: noviembre de 2013.

1.5. Interruptores termo magnéticos y electromagnéticos

Estos interruptores protegen a los circuitos secundarios y ramales contra sobrecargas y corto circuito. El mecanismo genera la capacidad de realizar operaciones repetitivas. Estos están formados principalmente por tres elementos: elementos de disparo, mecanismo de operación y extinguidores de arco.

Los interruptores termo magnéticos actúan por acción térmica y magnética, cuando una corriente mayor a la de ajuste y/o valor del interruptor circula por una banda bimetálica, esta se dilata y actúa mecánicamente para activar el mecanismo de operación de apertura.

Figura 21. Esquema básico de un interruptor termo magnético

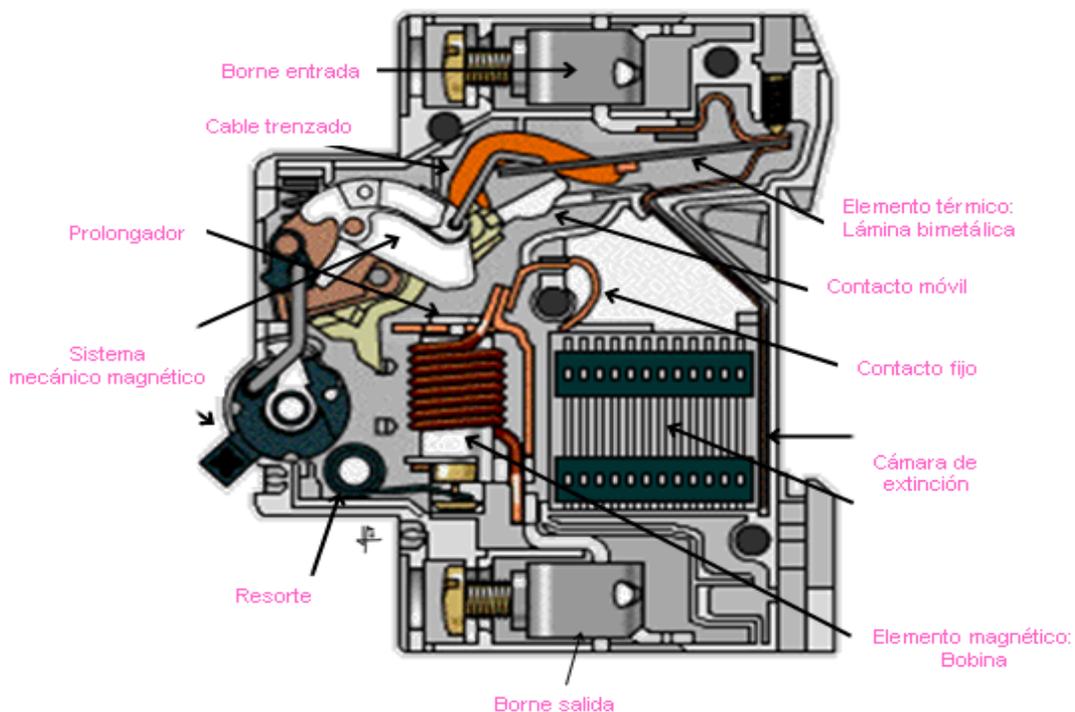


Fuente: <http://patentados.com>. Consulta: noviembre de 2013.

Los interruptores de acción magnética se utilizan para liberar corrientes de gran magnitud, por ejemplo, cuando la corriente llega a un valor alto, esta circula por un solenoide, el cual genera un campo magnético lo suficientemente fuerte para abrir un contacto. Los interruptores termo magnéticos, combinan las funciones térmicas y magnéticas para apertura de circuitos y funcionan con curvas inversas según los fabricantes.

Los interruptores termo magnéticos se fabrican desde valores de 15 A hasta 2.5 kA en corriente alterna y directa. Con capacidades de interrupción de 18 KA hasta 200 KA y 48 v en corriente alterna.

Figura 22. **Esquema de un interruptor electromagnético**



Fuente: <http://hogar.yoreparo.com>. Consulta: noviembre de 2013.

Los interruptores electromagnéticos industriales se utilizan para proteger los secundarios de transformadores, centros de carga y motores. Las unidades de disparo disponibles se pueden ajustar a las siguientes curvas, de disparo diferido largo (L), de tiempo diferido corto (S), instantáneo (I) y de protección contra fallas (G).

El tiempo diferido largo se utiliza para proteger al transformador de sobrecargas y corto circuito. El tiempo diferido corto e instantáneo se utiliza para proteger centros de cargas y control de motores, conociendo la corriente de corto circuito en la barra y finalmente para protección de falla a tierra se utiliza la escala más pequeña.

Figura 23. **Interruptores electromagnéticos industriales**



Fuente: <http://megaenlinea.com>. Consulta: noviembre de 2013.

2. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO

2.1. Clasificación de las fallas eléctricas industriales

Un sistema eléctrico está diseñado para suministrar energía eléctrica de manera confiable a equipos y dispositivos tales como motores, transformadores, equipo de electrónica de potencia, etc. en la operación o dinámica de los sistemas eléctricos se pueden generar corrientes con una magnitud arriba de la nominal, las cuales generan sobrecargas y cortos circuitos.

- Las sobrecargas: son corrientes con valores mayores a la nominal, las cuales aparecen en el sistema eléctrico por varias razones siendo una de las más frecuentes la falta de lubricación en cojinetes de motores de considerable capacidad. Cuando la lubricación empieza a fallar, el motor empieza a consumir mayor corriente eléctrica para vencer esa resistencia mecánica por frenado que se presenta. Otro ejemplo de sobrecarga se presenta cuando en la instalación se sobrepasa el valor de capacidad de carga instalada, ocasionando así una sobrecarga. Generalmente una sobrecarga es igual a un valor de 5 a 6 veces la corriente nominal.
- Corto circuito: se considera a un corto circuito como una conexión eléctrica en donde el valor de resistencia o impedancia es muy bajo y los niveles de potencial son diferentes. El comportamiento de una corriente de corto circuito se caracteriza por tener valores grandes de muchas veces la corriente nominal y un comportamiento instantáneo de tiempo. Cuando se genera un corto circuito, la corriente nominal se dispara a valores tan elevados debido a que la resistencia o impedancia que está

presente en ese momento esta únicamente dada por el valor de resistencia de los conductores e impedancia de la fuente.

Un corto circuito puede originarse por vibración en los sistemas, lo cual puede repercutir en el deterioro de los aislantes de máquinas rotativas y estáticas (motores y transformadores) generando cortos entre fase y fase o fase y tierra. Otro detalle que puede generar corto circuito es la pérdida de distancia de fuga en los aisladores, los cuales se ven afectados por la contaminación, produciéndose flameos de corto circuito. A continuación se enumeran los tres efectos del corto circuito.

- Arco Eléctrico: este se presenta cuando se rompe la rigidez dieléctrica del medio donde está ocurriendo la falla, ocasionando calor excesivo por tratarse de una corriente con valores de cientos hasta miles de amperios.
- Calentamiento: debido a los altos de valores de corriente de corto circuito, va acompañado de una temperatura alta la cual deteriora los aislamientos de conductores y máquinas, pudiendo presentar el peligro de incendio si la temperatura llegara a valores muy elevados.
- Esfuerzos magnéticos: por la ley de Faraday, cuando circula una corriente eléctrica en un conductor, esta produce una intensidad de campo magnético alrededor de este. Considerando el caso de falla de un corto circuito, se sabe que la corriente puede tener valores en KA, lo que genera campos magnéticos intensos que pueden inducir otras corrientes o interferencias magnéticas.

En resumen con el análisis de corto circuito, se está tratando de obtener información de los valores de corriente y voltaje que va a tener presente en el

sistema eléctrico cuando se presenta una falla, con el objetivo o finalidad de dimensionar las protecciones con los valores adecuados y capacidad interruptiva de extinguir el arco. Para tener sistemas confiables de continuidad de servicio y protección de las personas.

En un sistema eléctrico es importante conocer los siguientes valores:

- Corrientes nominales
- Corrientes de sobrecarga
- Corrientes de corto circuito

Para dimensionar los siguientes dispositivos:

- Barras
- Cables
- Dispositivos de maniobra y protección

Es importante conocer las corrientes de corto circuito máximas y mínimas para dimensionar las protecciones y capacidades interruptivas, por ejemplo, en instalaciones de baja tensión lo que ocasiona mayor aporte a las fallas de corto circuito es la falla trifásica y lo que ocasiona menor magnitud de corriente de corto circuito son las fallas de fase-neutro y fase-fase. Esta información sirve para calcular los esfuerzos térmicos y electrodinámicos.

Las fallas se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.1.1. Por la causa

En los sistemas eléctricos se pueden tener fallas de sobrecarga o corto circuito por razones importantes como esfuerzos o eventos eléctricos, mecánicos, térmicos y combinación y relación dinámica entre estos. A continuación se presenta una tabla en donde se describen los tipos y causas de fallas más frecuentes:

Tabla IV. Tipos y causa de fallas

TIPO	CAUSA
Aislamiento	Defectos de fábrica, mal diseño, envejecimiento, contaminación por humo, corrosión salina, vibraciones, temperaturas extremas
Eléctrico	Descargas electro atmosféricas, sobretensiones transitorias por maniobra, sobretensiones dinámicas,
Térmico	Falla de sobrecorriente, sobretensión, temperaturas extremas y cortos circuitos
Mecánico	Esfuerzos por sobrecorriente, sismos, impactos por objetos, nieve y lluvia

Fuente:<http://www.editoressrl.com.ar/sites/default/files/Control%20inteligente%20de%20motores>. Consulta: febrero de 2013.

2.1.2. Por la conexión

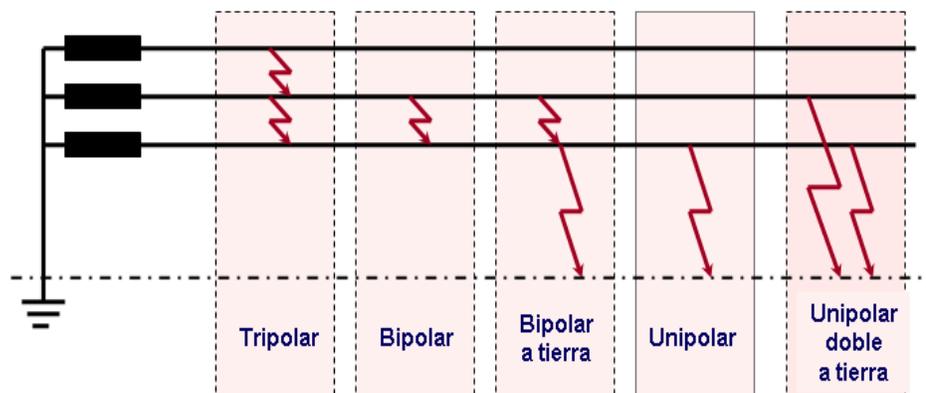
En los sistemas eléctricos trifásicos, se tienen las siguientes fallas según el tipo de conexión e incidencia de las mismas.

- Falla monofásica: se presenta cuando el cortocircuito se da entre una fase y tierra.
- Falla bifásica: ocurre cuando la falla se da entre fase y fase
- Falla bifásica a tierra: se presenta cuando la falla ocurre entre dos fases y tierra.
- Falla trifásica: ocurre cuando la falla es de entre las 3 fases

Tomando en cuenta que el efecto trifásico es el que provoca las corrientes más elevadas.

A continuación se presenta la figura 24 donde se muestran los diagramas de estas fallas.

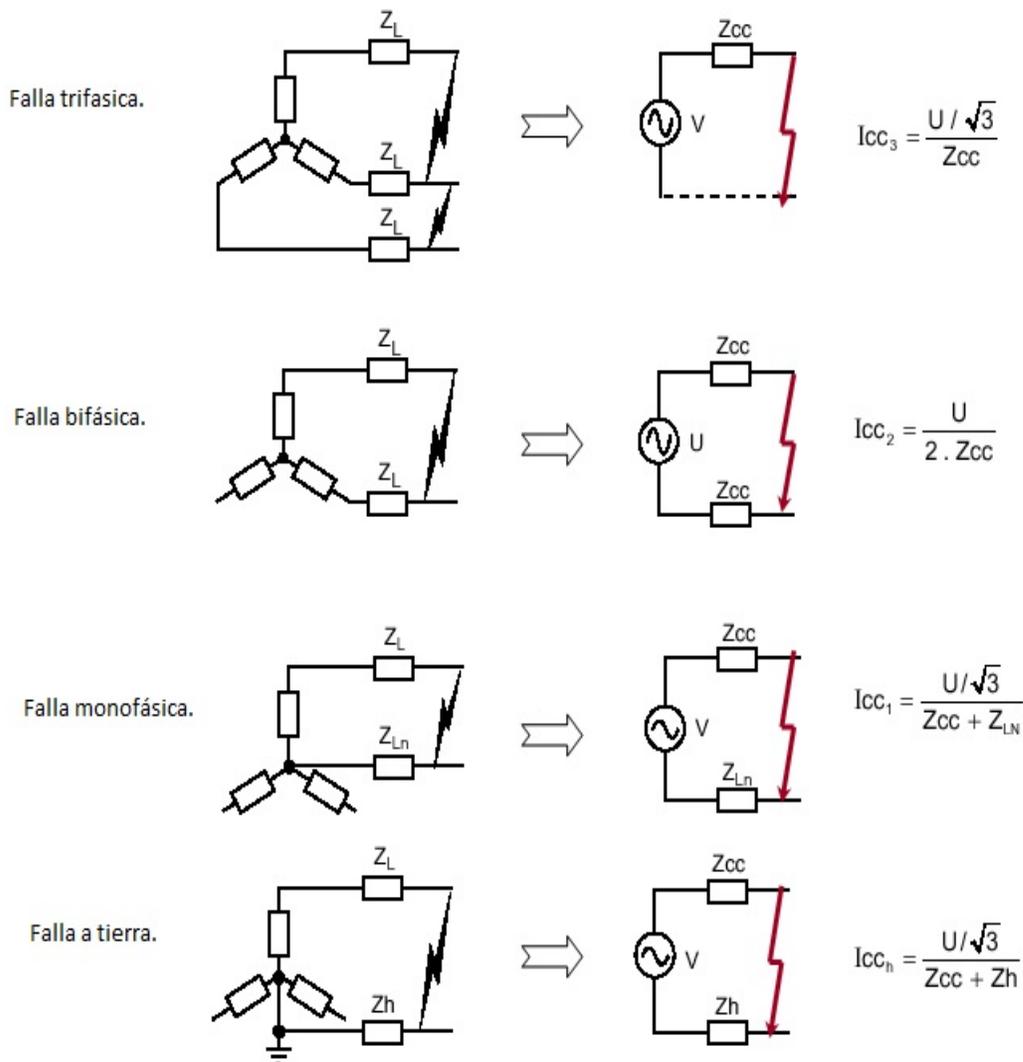
Figura 24. Tipo de fallas



Fuente: <http://www.tuveras.com/lineas/cortocircuito/cortocircuito.htm>. Consulta: febrero de 2013.

A continuación se presenta la figura 25 donde se muestra las conexiones:

Figura 25. Diagrama de fallas



Fuente: www.inele.ufro.cl/apuntes/...de.../3_SISTEMA_EN_PU. Consulta: febrero de 2013.

A continuación se presenta la tabla V en donde se describen las probabilidades de ocurrencia de fallas.

Tabla V. **Probabilidades de incidencia de fallas**

TIPO	PROBABILIDAD (%)
Monofásica	85
Bifásica a Tierra	8
Bifásica	5
Trifásica	2

Fuente: <http://www.scielo.org.co/scielo>. Consulta: febrero de 2014.

2.1.3. Sistema de valores por unidad (P.U.)

Las líneas de transmisión de potencia se operan a niveles en los que el kilovolt (kV) es la unidad más conveniente para expresar los voltajes, otros términos comunes utilizados son los kilowatts o kilovoltamperes, megavoltamperes. Para saber el valor de las corrientes de cortocircuito que circula en una red eléctrica se necesita saber que método utilizar para calcularse, a continuación se describe el método más adecuado para el cálculo, el método de valores en por unidad.

El análisis de los sistemas eléctricos con frecuencia se emplea el método de valores en por unidad de tensiones, corrientes, impedancias, así como de las potencias. El valor en por unidad de una magnitud se define como la relación del valor al valor base, expresada como un decimal. Al utilizar el método los valores en por unidad es mucho más sencillo que utilizar los valores nominales en voltio, amperio y ohmio.

Debido a que los parámetros, como tensiones, corrientes, impedancias y potencias, están relacionados entre sí se puede seleccionar valores base para dos cualesquiera que determinen los valores base de los otros dos. Si se especifica los valores base de la tensión y la corriente se puede determinar la impedancia base y la potencia base. La impedancia base es aquella que da lugar a una caída de tensión igual a la tensión base, cuando la corriente que circula por dicha impedancia sea igual al valor base de la corriente. Las potencias base, en sistemas monofásicos son el producto de la tensión base en kV por la corriente base en A.

Normalmente, las magnitudes a elegir para seleccionar las bases son la potencia en kVA y la tensión en kV. En un sistemas monofásicos o trifásicos la corriente se refiere a la corriente de línea, el termino tensión se refiere a la tensión al neutro y la potencia son kVA por fase, relacionándose las diversas magnitudes por medio de las ecuaciones siguientes.

La cantidad base se designa con el subíndice B, por lo tanto se tiene:

$$\text{Potencia base trifásica} = S_{3\phi B}$$

$$\text{Tensión base de línea} = V_{BL}$$

Para calcular la corriente base y la impedancia base se hace directamente a partir de los valores trifásicos base en kV y kVA. Se interpreta que los kVA base son los totales de las tres fases y la tensión base en kV es la tensión base de línea se tiene:

Ecuación 2.1.

$$I_B = \frac{S_{3\phi B}}{\sqrt{3} * V_{BL}} = \frac{MVA}{\sqrt{3} * kV}$$

Y de la ecuación de la impedancia

Ecuación 2.2.

$$Z_B = \frac{V_{BL}^2}{S_{3\phi B}} = \frac{kV^2}{MVA}$$

Así se tiene:

Ecuación 2.3.

$$Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_B} = \frac{Z_{\Omega}}{\frac{V_{BL}^2}{S_{3\phi B}}} = Z_{\Omega} \frac{S_{3\phi B}}{V_{BL}^2}$$

2.1.4. Cambio de base para los valores por unidad

En unas ocasiones la impedancia por unidad de un componente de un sistema se expresa sobre una base distinta que la seleccionada en el lugar donde la componente se localiza. Es necesario contar con métodos para convertir las impedancias en por unidad de una base a otra, debido a que al hacer cálculos, todas las impedancias de un sistema se deben expresar sobre la misma impedancia base.

La ecuación 2.3 muestra que la impedancia por unidad es directamente proporcional a los MVA base e inversamente proporcional al cuadrado de la tensión base. Dos impedancias en por unidad referidas a las respectivas cantidades base se puede escribir ahora usando los subíndices v para el valor anterior y n para el valor nuevo como se muestra en las siguientes ecuaciones 2.4 y 2.5.

Ecuación 2.4.

$$Z_V = Z_{\Omega} \frac{S_{BV}}{V_{BV}^2} [\text{pu}]$$

Ecuación 2.5.

$$Z_V = Z_{\Omega} \frac{S_{BV}}{V_{BV}^2} [\text{pu}]$$

Despejando de las ecuaciones anteriores a Z_{Ω} puesto que es igual para cualquier base se tiene:

Ecuación 2.6.

$$\frac{Z_V * Z_{BV}^2}{S_{BV}} = \frac{Z_N * Z_{BN}^2}{S_{BN}}$$

De donde sale la:

Ecuación 2.7.

$$Z_N = Z_V \left(\frac{V_{BV}}{V_{BN}} \right)^2 \left(\frac{S_{BN}}{S_{BV}} \right)$$

Para hacer el cambio de impedancia por unidad respecto a una base nueva se debe aplicar la ecuación 2.7. Esta ecuación no ocasiona ninguna dificultad con la transferencia del valor óhmico de la impedancia de un lado del transformador a otro. El valor de la ecuación está en el cambio de la impedancia por unidad que se da de una base particular a otra base, sin tener conocimiento del valor óhmico de Z_Ω .

Cuando el valor de tensión base es el mismo y se sustituye en la ecuación 2.7 se puede obtener la ecuación 2.8 cuando el valor de la impedancia esta dado en por unidad y la ecuación 2.9 cuando el valor de impedancia esta en por ciento.

Ecuación 2.8.

$$Z_{pu} = Z \left(\frac{S_{BN}}{S_{BV}} \right)$$

Ecuación 2.9.

$$Z_{pu} = \frac{\%Z}{100} \left(\frac{S_{BN}}{S_{BV}} \right)$$

- La conversión de valores en por unidad a valores reales.

Cuando se ha terminado de hacer los cálculos en por unidad en algún sistema y se requiere convertir alguna o todas estas cantidades a valores reales, el procedimiento se realiza en forma inversa, esto es:

Ecuación 2.10.

$$I = (I_{pu})(I_B) \text{ en A}$$

Ecuación 2.11.

$$V = (V_{pu})(V_B) \text{ en V}$$

Ecuación 2.12.

$$P = (P_{pu})(P_B) \text{ en W}$$

Ecuación 2.13.

$$Q = (Q_{pu})(Q_B) \text{ en VAR}$$

Ecuación 2.14.

$$S = (S_{pu})(S_B) \text{ en VA}$$

Si se necesita convertir una impedancia en por unidad en una impedancia en ohm se aplica la ecuación 2.15.

Ecuación 2.15.

$$Z = (Z_{pu})(Z_B) \text{ en } \Omega$$

- Selección de la base para los valores por unidad.

Una vez seleccionados los valores base en kV y MVA se realiza con el propósito de reducir al mínimo el proceso que lleva, el trabajo exigido por los cálculos. Primero se debe seleccionar un valor base para una parte del circuito. Después debe determinarse, de acuerdo con los principios que se desarrollaron en esta sección, la base en otras partes del circuito, separadas de la primera parte por los transformadores.

La base seleccionada debe ser de tal manera que lleve a valores por unidad de la tensión y la corriente del sistema, aproximadamente iguales a la unidad, de forma que se simplifique el cálculo. Se ahorra mucho tiempo si la base se selecciona de forma que pocas magnitudes por unidad ya conocidas tenga que convertirse a una nueva base.

Cuando un fabricante da la resistencia y la reactancia de un aparato en por ciento o por unidad se sobreentiende que las bases son los valores kV y MVA nominales del aparato. También existen tablas que dan los valores aproximados de las impedancias por unidad de generadores, transformadores, motores síncronos y de inducción. Los valores obtenidos de las tablas están basados en valores medios para aparatos de tipo y tamaño similar.

Los valores de la resistencia óhmica y la reactancia de pérdidas de un transformador dependen de que se midan en el lado de tensión alta o baja del transformador. Si se expresan por unidad, los MVA base se sobreentiende que son los nominales del transformador. La tensión base se sobreentiende que es la tensión nominal en el devanado de baja tensión del transformador y la tensión nominal en el devanado de alta tensión, si están referidos al lado de alta tensión del transformador. La impedancia por unidad de un transformador es la misma, no importa si se determina desde los valores óhmicos referidos a los lados de tensión alta o baja de los transformadores.

Para el análisis de un sistema de potencia se realiza un diagrama de impedancias con impedancias por unidad se inicia con el diagrama unifilar y la información nominal de la placa del generador, transformador y motores utilizando los valores óhmicos o impedancias por unidad o por ciento, más los datos acerca de las líneas de transmisión se debe de considerar los siguientes puntos.

- Se tiene que seleccionar una base en MVA y kV en una parte del sistema. Los valores base para un sistema trifásico son los kVA o MVA trifásico y los kV de línea.
- Para otras partes del sistema, esto es para el otro lado del transformador, los kV base para cada lado se puede determinar por medio de la relación de transformación. Los kVA base serán los mismos en todas las partes del sistema. Se debe marcar los kV base de cada parte del sistema sobre el diagrama unifilar.
- La información de la impedancia disponible para transformadores trifásicos, generalmente se da en términos de unidades o por ciento y es la base determinada por las especificaciones.
- La impedancia en por unidad dada sobre una base diferente a la determinada para la parte del sistema en el cual está localizado el elemento se cambia a la base adecuado.

Para la resolución de este sistema se tiene que emplear el método de valores por unidad, aplicando el teorema de Thévenin, una impedancia equivalente y una tensión en cada punto de falla. Tomando la corriente de cortocircuito se puede calcular por medio de la ecuación 2.16.

$$I_{cc} = \frac{V}{Z}$$

Donde V es la tensión expresada en pu y Z es la impedancia equivalente de Thévenin en el punto de falla en pu.

La potencia de cortocircuito se puede calcular con la tensión de la línea, como lo indica la ecuación 2.17, aunque también con la tensión de fase con la ecuación 2.18.

Ecuación 2.17

$$P_{cc3\phi} = \frac{V_{Linea}^2}{Z}$$

Ecuación 2.18

$$P_{cc1\phi} = \frac{V_{fase}^2}{Z} \rightarrow P_{cc3\phi} = 3 * P_{cc1\phi}$$

2.2. Sistema de la compañía suministradora

Las compañías suministradoras de energía se ven afectadas de manera mínima cuando se produce una falla de cortocircuito, en vez de perjudicar, ayudan al sistema introduciendo impedancias por medio de los transformadores y líneas de transmisión y distribución, contribuyendo estos a que los consumidores especialmente las industrias no tengan un comportamiento como una sobrecorriente infinita.

3. COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PARA UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL

En la coordinación de dispositivos de protección se pueden mencionar a los fusibles, relevadores, interruptores de potencia, etc. Los cuales deben seleccionarse para que la falla pueda ser liberada en el menor tiempo posible. Los criterios que pueden jugar un papel importante en el diseño de la protección son la rapidez, eficacia, costo y simplicidad. Otro punto importante es tomar en cuenta los tiempos y corrientes máximas y mínimas que soportan los equipos en operación de una falla o sobrecarga.

En la coordinación de dispositivos de protección es muy importante respetar la selectividad de los mismos, porque cuando se presenta un corto circuito, solamente debe actuar el dispositivo de protección más cercano a la falla para no interrumpir el suministro eléctrico y apoyar la continuidad del servicio eléctrico. Para efectuar estos cálculos se utiliza el modo gráfico de las curvas tiempo-corriente, en donde se pueden determinar en base al valor de la pendiente la coordinación de los dispositivos, la base del entorno gráfico son hojas en papel logarítmico.

Los pasos que se deben seguir para un estudio de diseño y selección de protecciones de un sistema eléctrico son los siguientes:

- Recopilar la información deseada, sobre el sistema eléctrico a proteger, indicando las características de los elementos en el diagrama unifilar.

- Determinar los valores máximos de carga, de acuerdo a la capacidad nominal del circuito a proteger.
- Calcular las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas, en los puntos del sistema que sean importantes para la coordinación.
- Recopilar y seleccionar información técnicas sobre los circuitos de protección, existentes o que se instalaran, entre ellas las curvas características tiempo-corriente de cada dispositivo de protección. Esta información generalmente la suministra el fabricante.
- Ubicar y seleccionar las características y rangos de ajuste de los equipos de protección para que cumplan con las exigencias básicas del circuito a proteger y las normas existentes para tal fin.
- El proceso de coordinación debe realizarse de la carga hacia la fuente en los sistemas radiales.
- Realizar la coordinación es decir, escoger las características de operación y ajuste de los dispositivos de protección, de modo que exista la selectividad. Toda esta información se resume en gráficos de tiempo-corriente para verificar el cumplimiento de los requerimientos de protección y coordinación.

3.1. Coordinación fusible-relevador

Este arreglo de fusible-relevador se utiliza para proteger transformadores en subestaciones que no exceden de 10 MVA, en donde el tipo de fusible que se usa tiene que ser de potencia.

Un criterio muy importante que debe respetarse es que el tiempo mínimo de operación del relevador debe ser igual o menor al 75 % del tiempo mínimo de fusión del fusible es decir:

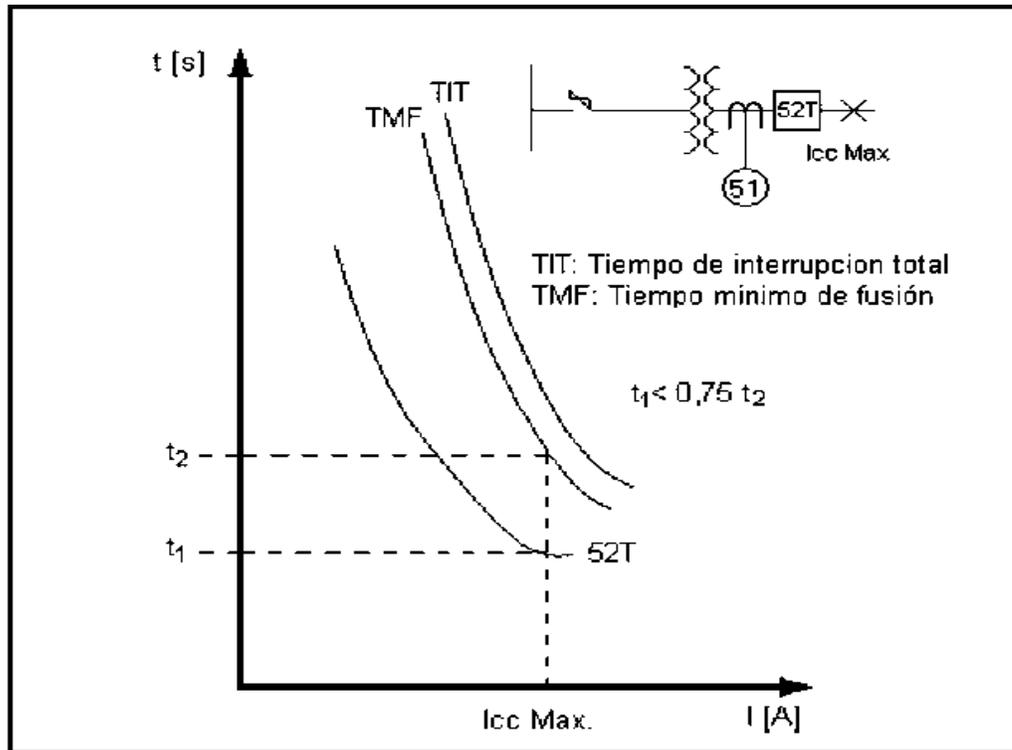
$$t_1 \leq 0,75 t_2$$

Siendo t_1 el tiempo de operación del relevador y t_2 el tiempo mínimo de fusión del fusible. Este criterio ayuda a que el fusible opere y se funda solo cuando la corriente de cortocircuito llegue a un valor alto que sobrepase el margen de trabajo del relevador.

La coordinación entre estos dos dispositivos ayuda a que el fusible no se vea lisiado por operaciones del relevador y que afecte la estructura física.

Al seleccionar la curva tiempo-corriente del relevador y fusible, se debe tener cuidado de seleccionar curvas del mismo tipo para que vayan paralelas en el grafico es decir se eligen la extremadamente inversa para el relevador, lo mismo se tendrá que elegir para el fusible. Si no se respeta esto, puede surgir el problema de que cuando se presente una corriente alta de corto circuito, las curvas se pueden acercar demasiado en un punto y los dos dispositivos pueden actuar al mismo tiempo.

Figura 26. **Curvas de coordinación del relevador-fusible**



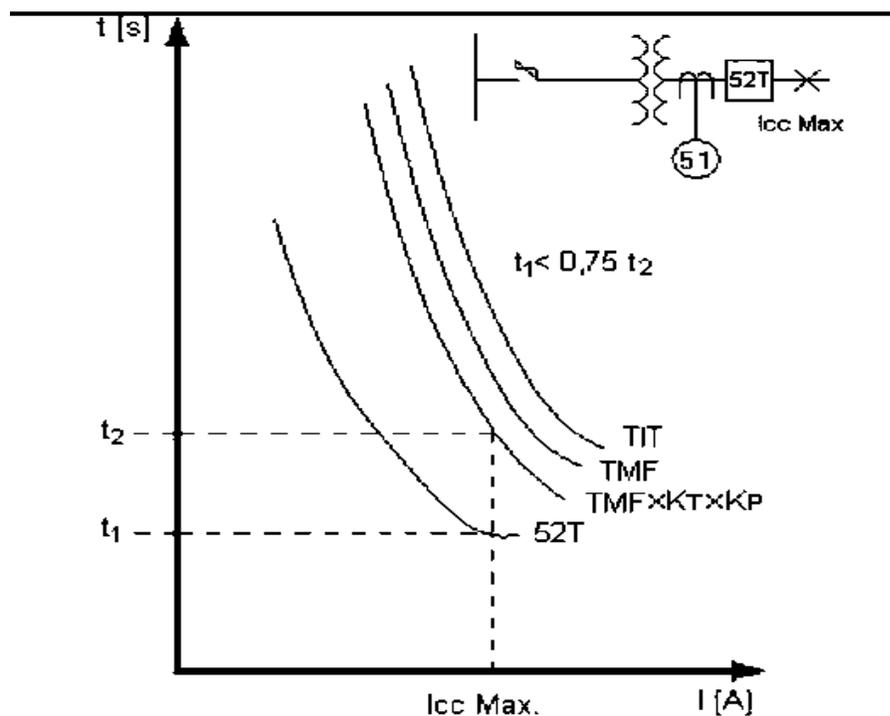
Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

Circuito, las curvas se pueden acercar demasiado en un punto y los dos dispositivos pueden actuar al mismo tiempo. Existen 2 factores muy importantes que se deben de tomar en cuenta para brindar un margen extra de seguridad en la coordinación estos son: K_T y K_p siendo el primero un factor que determina la temperatura ambiente y el segundo alguna corriente de prefalla que puede presentarse en el sistema.

Esto se aplica en la curva TMF (tiempo mínimo de fusión del fusible) es decir que se desplaza verticalmente en el plano cartesiano, dependiendo de las

condiciones del entorno. Por ejemplo, si se tiene un clima con temperaturas muy altas y condiciones de sobrecarga en el transformador, lo más conveniente es aplicar estos factores para que los bajen verticalmente la curva TMF y el fusible pueda actuar más rápido, caso contrario si se tiene un clima con temperaturas bajas y condiciones de sobredimensionamiento en el transformador, estos coeficientes los suben la curva TMF para que actúe más lento el fusible.

Figura 27. **Aplicación de factores KT y Kp a curva TMF**



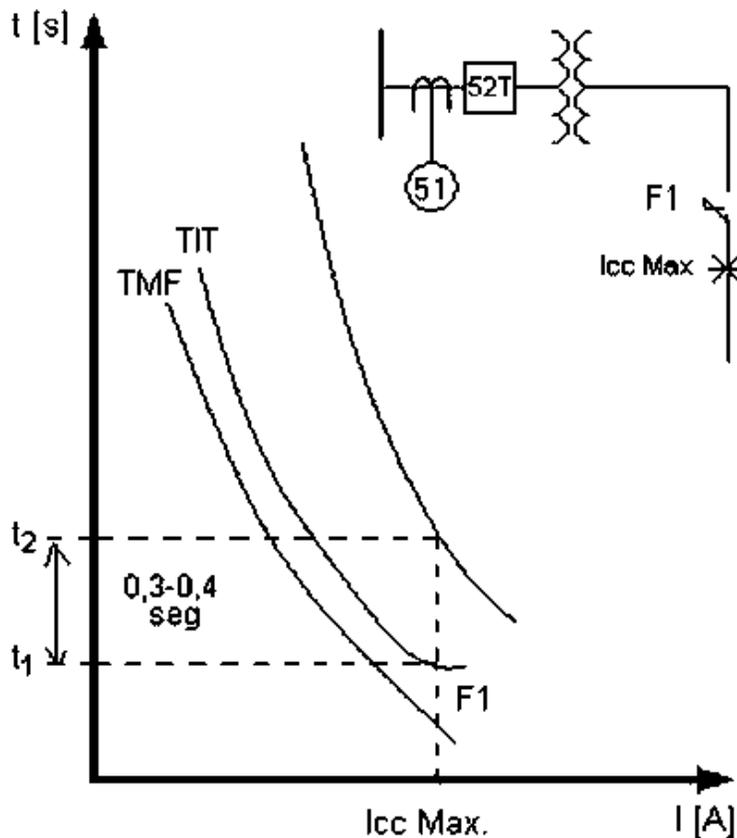
Fuente: Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

En la gráfica se puede apreciar el comportamiento de la curva TMF después de multiplicarla por los factores K_T y K_P . Hay un desplazamiento vertical hacia abajo.

3.2. Coordinación relevador-fusible

Esta aplicación se da generalmente cuando se tienen dispositivos ubicados en diferentes localidades. Por ejemplo, el relevador se utiliza para proteger circuitos de distribución y los fusibles se utilizan para proteger ramales. El criterio establece que debe de existir un tiempo mínimo de coordinación de 0.3 segundos entre la curva TIT del fusible y la curva característica del relevador para corriente máxima de corto circuito.

Figura 28. Coordinación de relevador-fusible



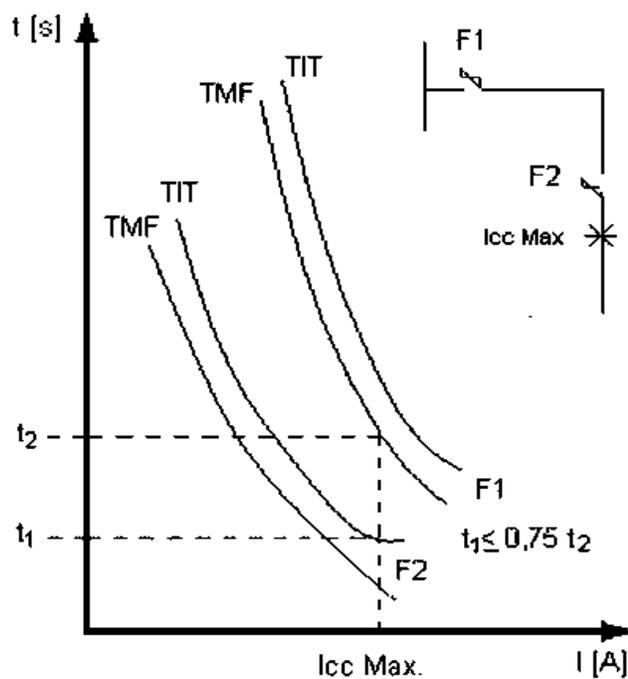
Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

Como se pueden apreciar en la figura al producirse una falla en el ramal, el relevador realiza la primera apertura con la función selectiva, y reengancha. Anulando la función de apertura instantánea, si la falla persiste en el ramal, el fusible se funde por la diferencia de 0,3 segundos que existe entre la curva TIT del fusible y la curva característica del relevador.

3.3. Coordinación fusible-fusible

Este arreglo se aplica para ramales o una misma red de distribución, donde un fusible actúa como primario y el otro como respaldo. El primero puede proteger ramales directamente y el de respaldo puede destinarse para proteger transformadores de distribución por ejemplo.

Figura 29. Coordinación de fusible-fusible



Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

Según la gráfica se puede definir a t_1 como el tiempo de apertura máxima del fusible primario y a t_2 como el tiempo mínimo de fusión para el fusible de respaldo. El criterio que gobierna este esquema es el siguiente:

$$t_1 \leq 0,75 t_2$$

Como una recomendación de campo es importante reemplazar los fusibles dañados por unos que tengan características iguales y de preferencia del mismo fabricante para no afectar el arreglo de coordinación de las protecciones del sistema.

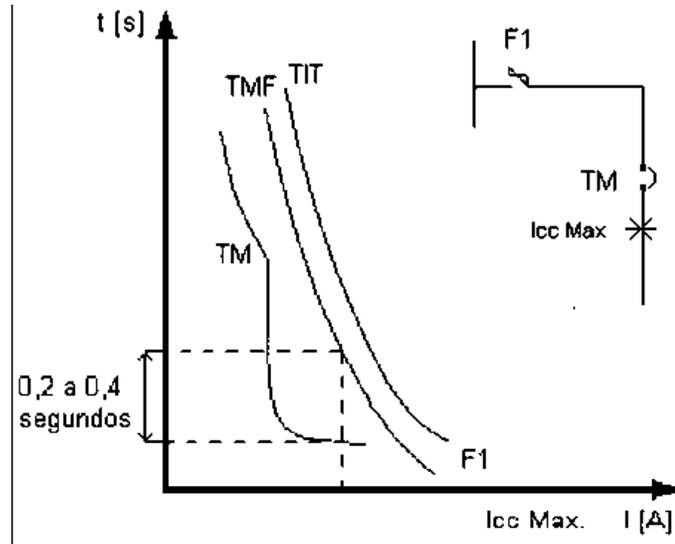
3.4. Coordinación fusible-interruptor

Este arreglo es para aplicaciones en ramales comunes es decir que se tiene que tener especial cuidado en respetar el criterio que dice que debe de existir una coordinación entre las curvas del interruptor y fusible de entre 0,2 a 0,4 segundos. Como se puede apreciar en la gráfica, la curva del fusible no toca a la curva del interruptor en la zona de sobrecarga. Hasta que se llega a la zona de disparo del interruptor ambas curvas quedan cerca, (ver figura 30).

3.5. Coordinación relevador-relevador

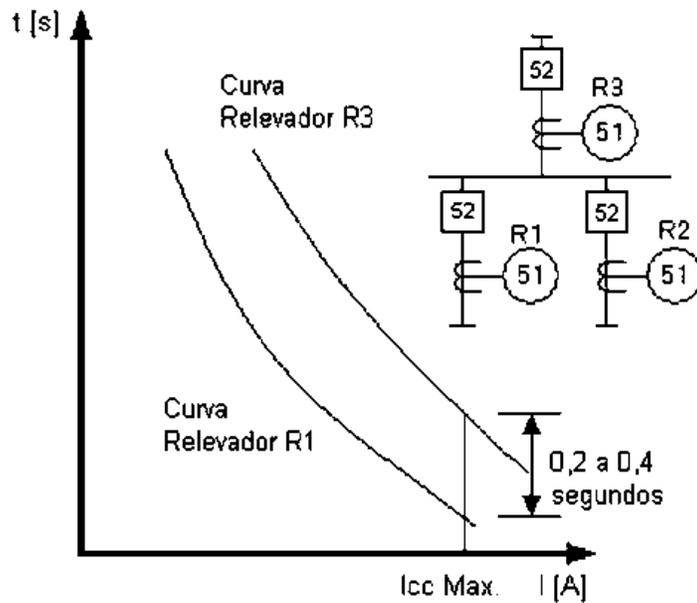
Este arreglo se utiliza en circuitos en serie. Cuando se presenta una falla de corto circuito, estos deben de estar coordinados con un margen de tiempo entre las curvas de 0,2 a 0,4 segundos. Este intervalo incluye el tiempo en que actúa el interruptor (0,12 segundos) y el tiempo en que actúa el relevador (0,10 segundos).

Figura 30. **Coordinación de fusible-interruptor**



Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

Figura 31. **Coordinación de relevador-relevador**



Fuente: J.C Gaudio. *Criterio de Ajuste y Coordinación del Sistema de Protección*. SEIN, Transen S.A.

4. CASO DE ESTUDIO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL

4.1. Cálculo de las corrientes trifásicas del sistema industrial

Con los datos de la red eléctrica del sistema industrial se puede determinar las corrientes y potencias de cortocircuito en las barras colectoras para el sistema industrial que se va analizar. La compañía suministradora de 69 kV, 3 fases, 3 hilos, 60 Hz, con una potencia de cortocircuito de 500 MVA.

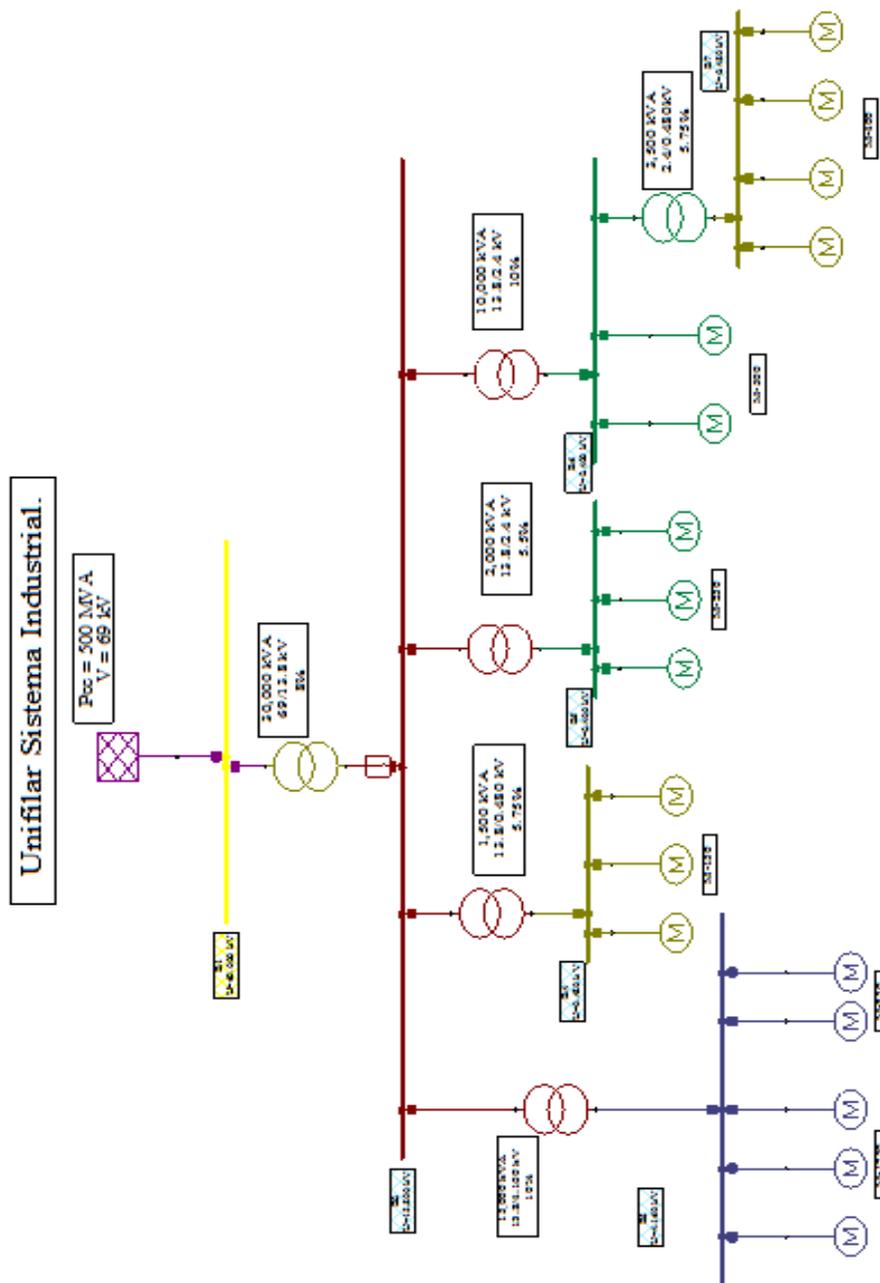
Tabla VI. Datos del equipo del sistema industrial

Datos Equipo del Sistema Industrial.				
Tipo	Potencia S(kVA)	Voltaje (kV)	Impedancia.	Conexión.
Trafo. T1	30000	69/13.8	8%	Δ/Y
Trafo. T2	15000	13.8/4.160	10%	Δ/Y
Trafo. T3	1500	13.8/0.480	5.75%	Δ/Y
Trafo. T4	2000	13.8/2.4	5.5%	Δ/Y
Trafo. T5	10000	13.8/2.4	10%	Δ/Y
Trafo. T6	3500	2.4/0.480	5.75%	Δ/Y
Tipo	Potencia HP	Voltaje (kV)	Reactancia.	Frecuencia HZ
Motor	150	0.480	5.00%	60
Motor	250	2.4	5.00%	60
Motor	400	0.480	5.00%	60
Motor	500	2.4	5.00%	60
Motor	850	4.16	5.50%	60
Motor	1250	4.16	12.00%	60

Fuente: Ingenio Madre Tierra. 2012.

A continuación el diagrama Unifilar del sistema industrial que se va a analizar cómo se puede apreciar en la figura

Figura 32. Diagrama Unifilar del sistema industrial



A continuación se realiza el cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico.

Se define los valores base de tensión y potencia.

$$V_B = 69 \text{ kV}$$

$$S_B = 30 \text{ MVA}$$

Ahora se calculan los valores en por unidad empleando la ecuación 2.9.

El valor para la compañía suministradora es:

$$Z_{pu} = 1 * \frac{30 \text{ MVA}}{500 \text{ MVA}} = 0,06 \text{ pu}$$

De esta forma se realiza los cálculos en valores por unidad para cada uno de los transformadores que se encuentran en el sistema eléctrico industrial.

Trasformador T-1.

$$Z_{T1 \text{ pu}} = \frac{8 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{30 \text{ MVA}} = 0,08 \text{ pu}$$

Trasformador T-2.

$$Z_{T2 \text{ pu}} = \frac{10 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{15 \text{ MVA}} = 0,20 \text{ pu}$$

Transformador T-3

$$Z_{T3 \text{ pu}} = \frac{5,75 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{1,5 \text{ MVA}} = 1,15 \text{ pu}$$

Transformador T-4.

$$Z_{T4 \text{ pu}} = \frac{5,5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{2 \text{ MVA}} = 0,825 \text{ pu}$$

Transformador T-5

$$Z_{T5 \text{ pu}} = \frac{10 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{10 \text{ MVA}} = 0,30 \text{ pu}$$

Transformador T-6

$$Z_{T6 \text{ pu}} = \frac{5,75 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{3,5 \text{ MVA}} = 0,49 \text{ pu}$$

Se procede a realizar los cálculos en valores por unidad para cada uno de los motores del sistema eléctrico industrial.

Si un motor de 150 HP (en forma aproximada 1HP = 1kVA).

Motores

$$Z_{M-150 \text{ pu}} = \frac{5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{0,15 \text{ MVA}} = 10 \text{ pu}$$

$$Z_{M-250 \text{ pu}} = \frac{5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{0,250 \text{ MVA}} = 6 \text{ pu}$$

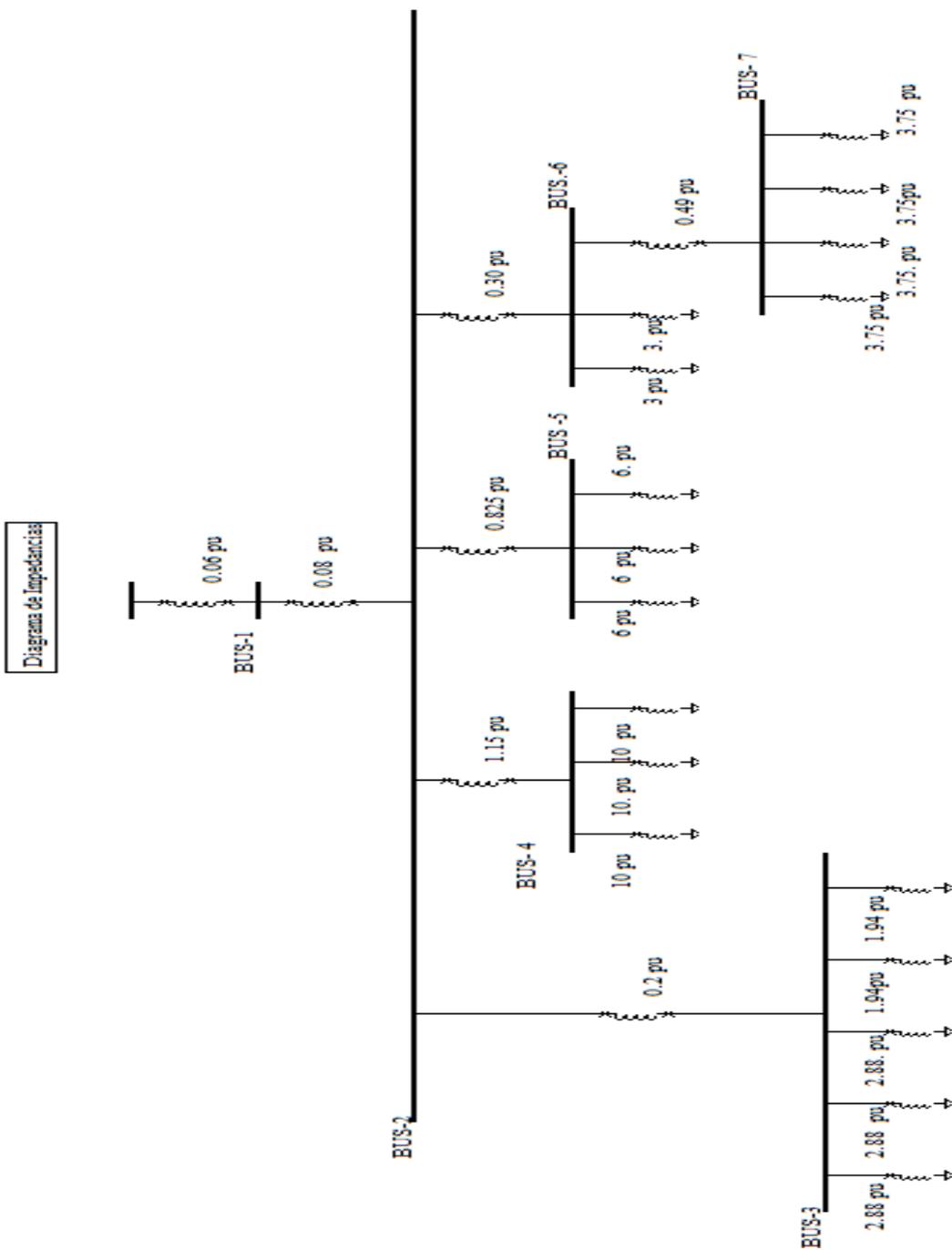
$$Z_{M-400 \text{ pu}} = \frac{5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{0,400 \text{ MVA}} = 3,75 \text{ pu}$$

$$Z_{M-500 \text{ pu}} = \frac{5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{0,500 \text{ MVA}} = 3 \text{ pu}$$

$$Z_{M-850 \text{ pu}} = \frac{5,5 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{0,850 \text{ MVA}} = 1,94 \text{ pu}$$

$$Z_{M-1250 \text{ pu}} = \frac{12 \%}{100 \%} * \frac{30 \text{ MVA}}{1,250 \text{ MVA}} = 2,88 \text{ pu}$$

Figura 33. Diagrama Unifilar equivalente de impedancias por unidad



Fuente: elaboración propia.

A partir de la figura 33 se realiza la reducción de la red para obtener el valor de la impedancia equivalente de Thévenin.

Calculo en la barras

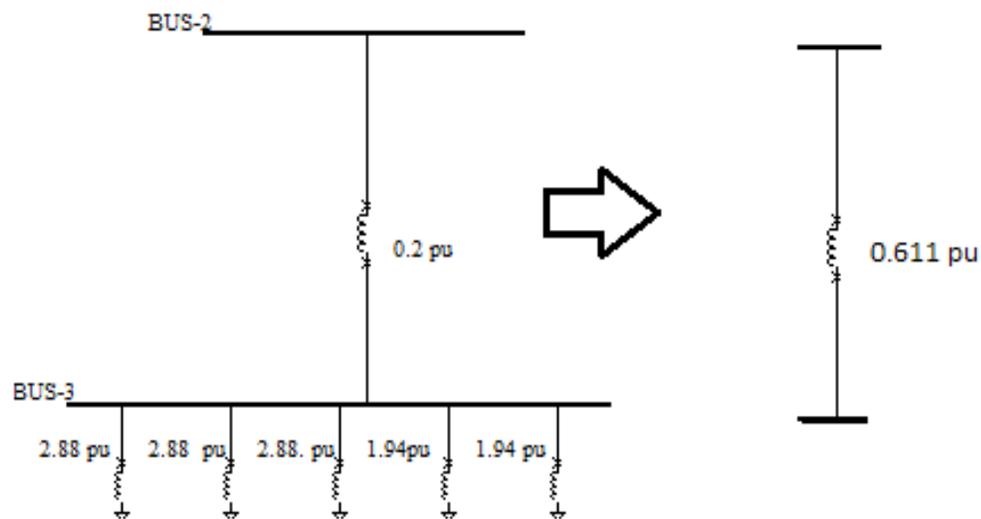
- Barra 1

La barra 5 tiene 5 impedancias en paralelo, que a la vez están en serie con la impedancia de la barra 2 el equivalente es el siguiente.

$$Z_{Eq_{B3}} = \left(\frac{1}{2,88} + \frac{1}{2,88} + \frac{1}{2,88} + \frac{1}{1,94} + \frac{1}{1,94} \right)^{-1} = 0,411 \text{ pu}$$

$$Z_{Eq_{T2}} = 0,2 + 0,411 = 0,611 \text{ pu}$$

Figura 34. **Equivalente de la Barra-3 a Barra-2**



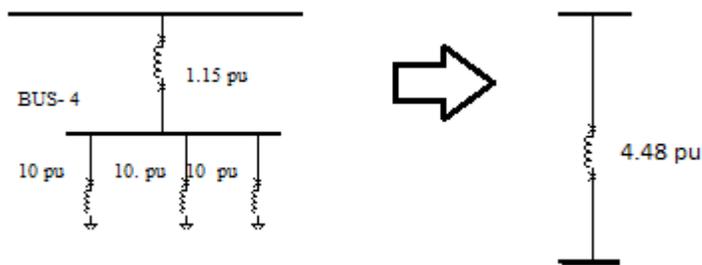
Fuente: elaboración propia.

La barra 4 tiene 3 impedancias en paralelo, que a la vez están en serie con la impedancia del transformador 3, a continuación se obtiene el equivalente.

$$Z_{Eq_B4} = \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10} \right)^{-1} = 3,33 \text{ pu}$$

$$Z_{Eq_T3} = 3,33 + 1,15 = 4,48 \text{ pu}$$

Figura 35. **Equivalente de la Barra-4 a Barra-2**



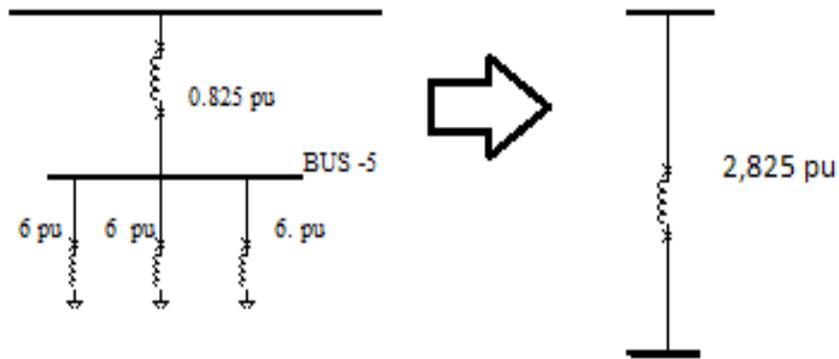
Fuente: elaboración propia.

La barra 5 tiene 3 impedancias en paralelo, que a la vez están en serie con la impedancia del transformador 4, a continuación se obtiene el equivalente.

$$Z_{Eq_B5} = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \right)^{-1} = 2 \text{ pu}$$

$$Z_{Eq_T4} = 2 + 0,825 = 2,825 \text{ pu}$$

Figura 36. **Equivalente de la Barra-5 a Barra-2**



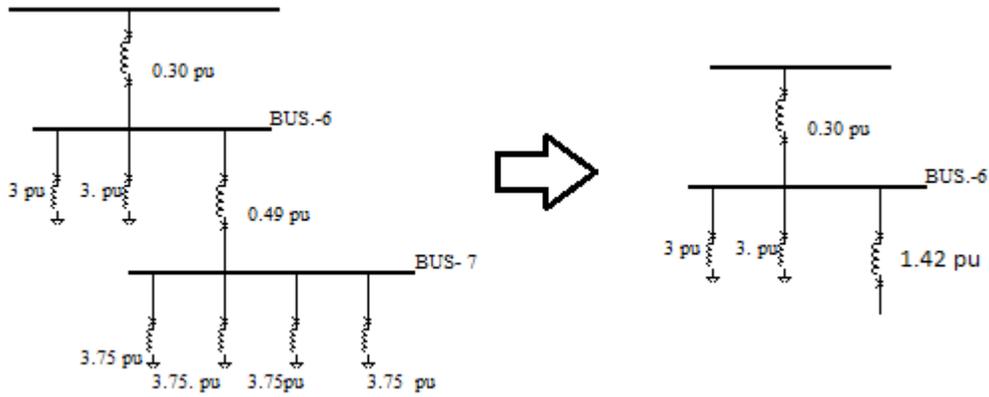
Fuente: elaboración propia.

Debido que a la barra 7, tiene 4 impedancias en paralelo, esta queda en serie con la impedancia del transformador 6, a continuación se obtiene el equivalente.

$$Z_{Eq_B7} = \left(\frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} \right)^{-1} = 0,93 \text{ pu}$$

$$Z_{Eq_T6} = 0,93 + 0,49 = 1,42 \text{ pu}$$

Figura 37. **Equivalente de la Barra-7 a Barra-6**



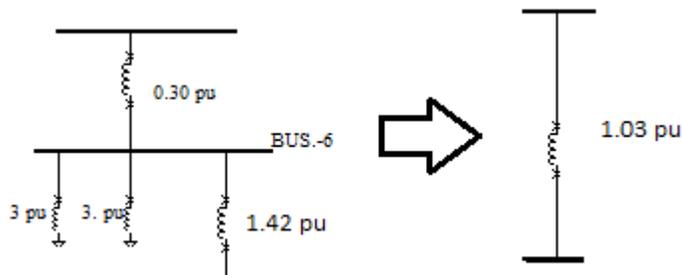
Fuente: elaboración propia.

La barra 6 tiene 3 impedancias en paralelo, que a la vez está en serie con la impedancia de la barra 2, a continuación se obtiene el equivalente.

$$Z_{Eq_B6} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{1,42} \right)^{-1} = 0,73 \text{ pu}$$

$$Z_{Eq_B2} = 0,73 + 0,30 = 1,03 \text{ pu}$$

Figura 38. **Equivalente de la Barra-6 a Barra-2**



Fuente: elaboración propia.

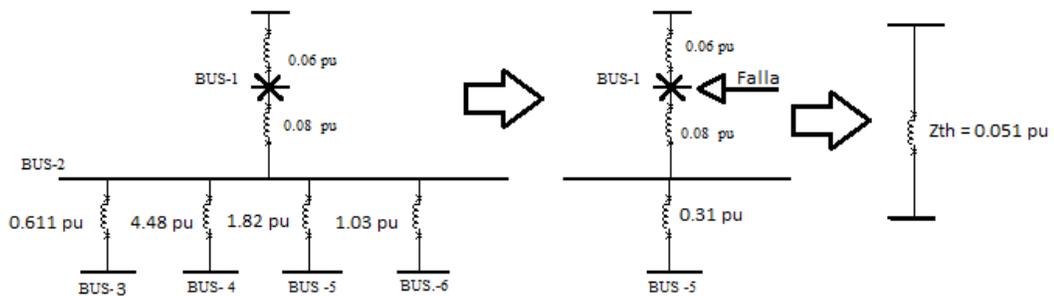
- Barra 1

Con el diagrama de la figura 38 se necesita encontrar la impedancia de equivalente de Thévenin para la falla en el barra 1. La barra 2 tiene 4 impedancias en paralelo, a la vez en serie con 1 impedancia de la barra 1.

$$E_{q,1} = \left(\frac{1}{0,611} + \frac{1}{4,48} + \frac{1}{2,82} + \frac{1}{1,03} \right)^{-1} = 0,31 \text{ pu}$$

$$E_{q,2} = 0,31 + 0,08 = 0,39 \text{ pu}$$

Figura 39. Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 1



Fuente: elaboración propia.

Para encontrar el equivalente de Thévenin en el punto de falla se tiene 1 impedancia en paralelo de barra 1, que a la vez está en paralelo con la impedancia de la compañía suministradora.

$$Z_{Th_{B1}} = \left(\frac{1}{0,39} + \frac{1}{0,06} \right)^{-1} = 0,051 \text{ pu}$$

Para calcular la corriente de cortocircuito se obtiene a partir de la ecuación 2.1, 2.10 y 2.15. La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,051} = 19,60 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 69 \text{ kV}} = 251,05 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 19,60 \text{ pu} * 251,05 \text{ A} = 4\,920,58 \text{ A} \approx 4,920\,58 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica se aplica la ecuación 2.19

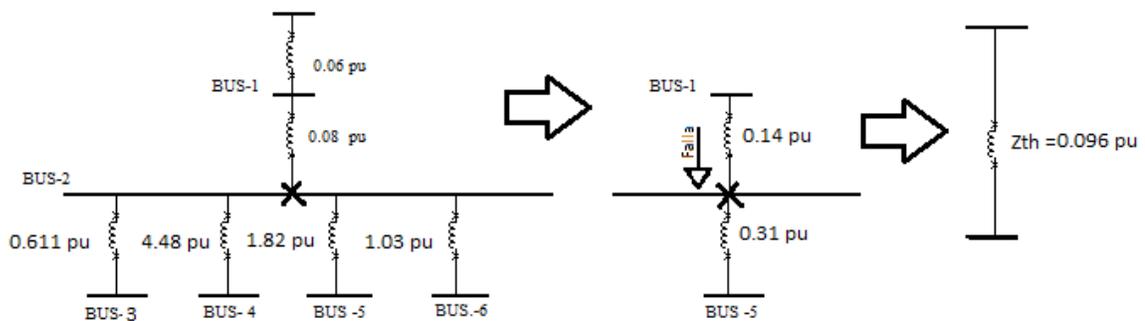
$$P_{cc} = \sqrt{3} * 69 \text{ kV} * 4,920\,58 \text{ kA} = 588,06 \text{ MVA}$$

- Barra 2.

Para calcular el punto de falla en barra 2 se tiene dos impedancias en serie, que a la vez tiene cuatro impedancias en paralelo, para obtener el equivalente de Thévenin se tiene dos impedancias en paralelo en el punto de falla como se muestra en la figura 40.

$$Z_{ThB2} = \left(\frac{1}{0,31} + \frac{1}{0,14} \right)^{-1} = 0,096 \text{ pu}$$

Figura 40. Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 2



Fuente: elaboración propia.

La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,096} = 10,41 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 13, \text{ kV}} = 1\,255,10 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 10,41 \text{ pu} * 1\,255,10 \text{ A} = 13\,065,59 \text{ A} \approx 13,065 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 13,8 \text{ kV} * 13,065 \text{ kA} = 312,28 \text{ MVA}$$

- Barra 3

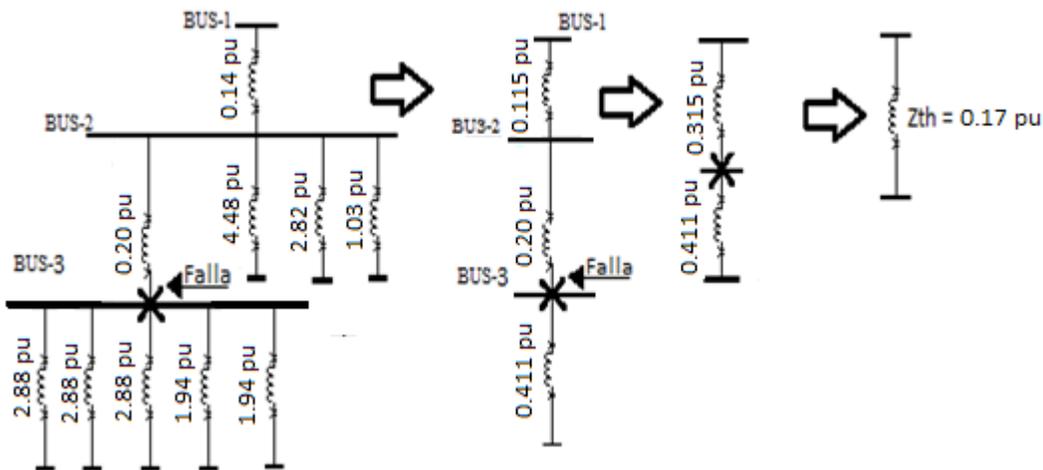
Para calcular el punto de falla en la barra 3 se puede observar en la figura 41, que se tiene 4 impedancias en paralelo que van a dar a la barra 2, que a la vez está en serie con 1 impedancia que conecta a la barra 3. Se calcula el equivalente de las cinco impedancias que conectan a la barra 3. Se calcula el equivalente de Thévenin en la barra 3 es el siguiente.

$$E_{q_1} = \left(\frac{1}{0,14} + \frac{1}{4,48} + \frac{1}{2,82} + \frac{1}{1,03} \right)^{-1} = 0,115 \text{ pu}$$

$$E_{q_2} = 0,115 + 0,2 = 0,315 \text{ pu}$$

$$Z_{Th_{B3}} = \left(\frac{1}{1,03} + \frac{1}{0,315} \right)^{-1} = 0,17 \text{ pu}$$

Figura 41. Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 3



Fuente: elaboración propia.

La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,17} = 5,88 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 4,160 \text{ kV}} = 4\,163,58 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 5,88 \text{ pu} * 4,163\,58 \text{ kA} = 24,481 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 4,160 \text{ kV} * 24,481 \text{ kA} = 176,39 \text{ MVA}$$

- Barra 4

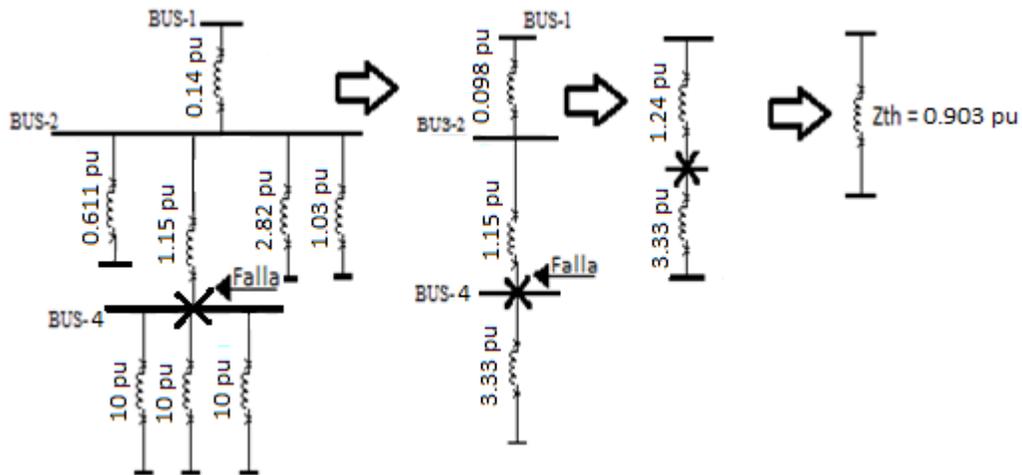
Para calcular el punto de falla en la barra 4 se puede observar en la figura 42, que se tiene 4 impedancias en paralelo que van a dar a la barra 2, que a la vez está en serie con 1 impedancia que conecta a la barra 4. Se calcula el equivalente de las tres impedancias que conectan a la barra 4. Se calcula el equivalente de Thévenin en la barra 4 es el siguiente.

$$E_{q_{1.1}} = \left(\frac{1}{0,611} + \frac{1}{0,14} + \frac{1}{2,82} + \frac{1}{1,03} \right)^{-1} = 0,098 \text{ pu}$$

$$E_{q_{2.2}} = 0,098 + 1,15 = 1,24 \text{ pu}$$

$$Z_{Th_{B4}} = \left(\frac{1}{1,24} + \frac{1}{3,33} \right)^{-1} = 0,903 \text{ pu}$$

Figura 42. Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 4



Fuente: elaboración propia.

La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0.903} = 1,107 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,480 \text{ kV}} = 36\,084,39 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 1,107 \text{ pu} \cdot 36,084\,39 \text{ kA} = 39,945 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot 0,480 \text{ kV} \cdot 39,945 \text{ kA} = 33,20 \text{ MVA}$$

- Barra 5

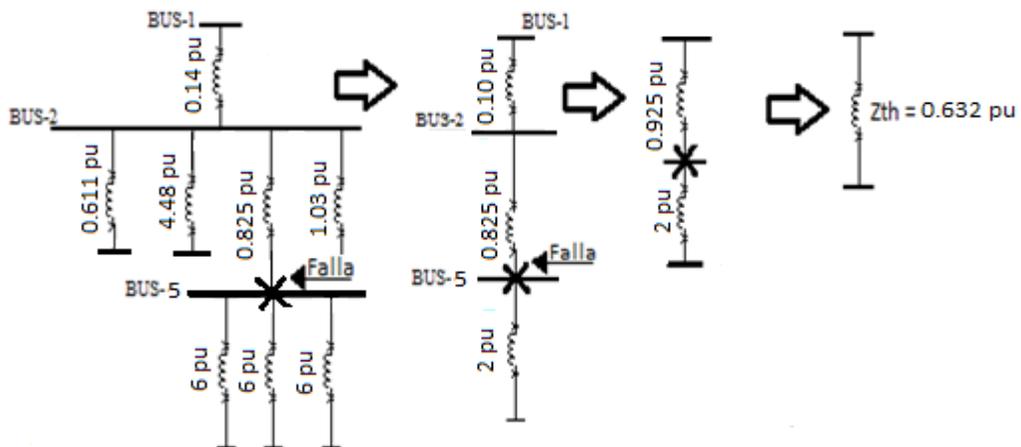
Para calcular el punto de falla en la barra 5 se puede observar en la figura 43, que se tiene 4 impedancias en paralelo que van a dar a la barra 2, que a la vez está en serie con 1 impedancia que conecta a la barra 5. Se calcula el equivalente de las tres impedancias que conectan a la barra 5. Se calcula el equivalente de Thévenin en la barra 5 es el siguiente.

$$E_{q_1} = \left(\frac{1}{0,611} + \frac{1}{4,48} + \frac{1}{0,14} + \frac{1}{1,03} \right)^{-1} = 0,10 \text{ pu}$$

$$E_{q_2} = 0,10 + 0,825 = 0,925 \text{ pu}$$

$$Z_{Th_B5} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{0,925} \right)^{-1} = 0,632 \text{ pu}$$

Figura 43. Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 5



Fuente: elaboración propia.

La corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,632} = 1.58 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 2,4 \text{ kV}} = 7\,216,87 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 1,58 \text{ pu} * 7216,87 \text{ A} = 11,402 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 2,4 \text{ kV} * 11,402 \text{ kA} = 47,38 \text{ MVA}$$

- Barra 6

Para calcular el punto de falla en la barra 6 se puede observar en la figura 44, que se tiene 4 impedancias en paralelo que van a dar a la barra 2, que a la vez está en serie con 1 impedancia que conecta a la barra 6. Se calcula el equivalente de las cuatro impedancias que conectan a la barra 7. Que a la vez está en serie con una impedancia que conecta a la barra 6. Quedando tres impedancias en paralelo conectadas a la barra 6. Se calcula el equivalente de Thévenin en la barra 6 es el siguiente.

$$E_{q_1} = \left(\frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,611} + \frac{1}{4,48} + \frac{1}{2,82} \right)^{-1} = 0,106 \text{ pu}$$

$$E_{q_2} = 0,106 + 0,30 = 0,406 \text{ pu}$$

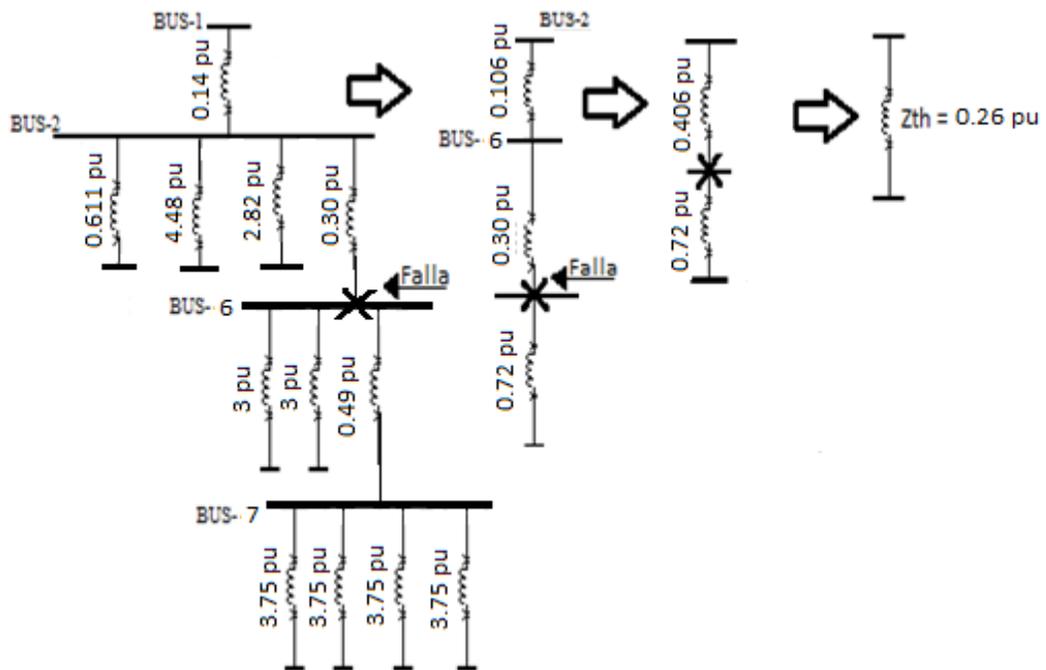
$$E_{q_3} = \left(\frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} + \frac{1}{3,75} \right)^{-1} = 0,937 \text{ pu}$$

$$E_{q_4} = 0,937 + 0,49 = 1,42 \text{ pu}$$

$$E_{q_5} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{1,42} \right)^{-1} = 0,72 \text{ pu}$$

$$Z_{Th_B6} = \left(\frac{1}{0,406} + \frac{1}{0,72} \right)^{-1} = 0,26 \text{ pu}$$

Figura 44. **Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 6**



Fuente: elaboración propia.

Corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,26} = 3,83 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 2,4 \text{ kV}} = 7\,216,87 \text{ A}$$

$$, I_{cc} = 0,665 \text{ pu} * 7\,216,87 \text{ A} = 27,640\,4 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 2,4 \text{ kV} * 27,640\,41 \text{ kA} = 114,89 \text{ MVA}$$

- Barra 7

Para calcular el punto de falla en la barra 7 se puede observar en la figura 45, que se tiene 4 impedancias en paralelo que van a dar a la barra 2, que a la vez está en serie con 1 impedancia que conecta a la barra 6. Se calcula el equivalente de las tres impedancias paralelas que conectan a la barra 6. Que a la vez está en serie con una impedancia que conecta a la barra 7. Se calcula el equivalente de Thévenin en la barra 7 es el siguiente.

$$E_{q,1} = \left(\frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,611} + \frac{1}{4,48} + \frac{1}{2,82} \right)^{-1} = 0,106 \text{ pu}$$

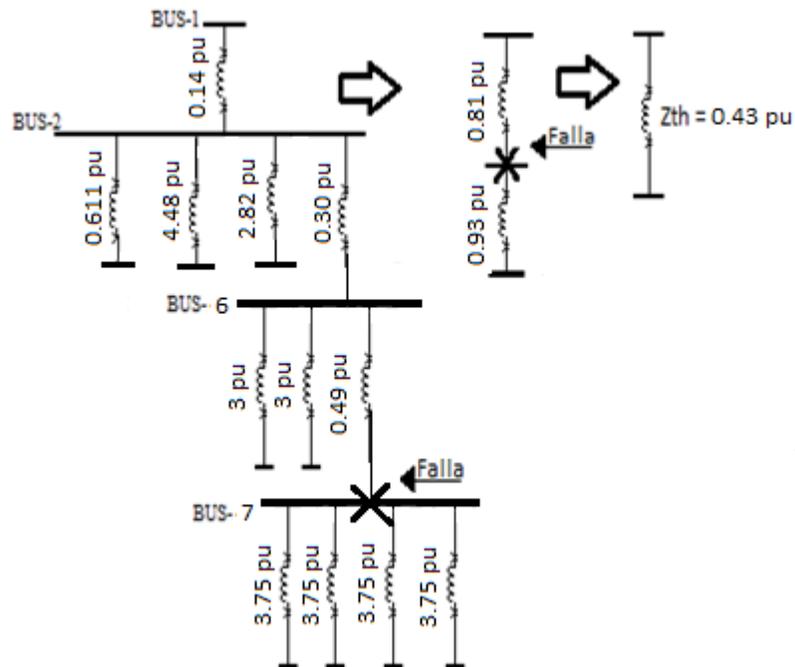
$$E_{q,2} = 0,106 + 0,30 = 0,406 \text{ pu}$$

$$E_{q,3} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{0,406} \right)^{-1} = 0,32 \text{ pu}$$

$$E_{q_4} = 0,32 + 0,49 = 0,81 \text{ pu}$$

$$Z_{Th_{B7}} = \left(\frac{1}{0,81} + \frac{1}{0,93} \right)^{-1} = 0,43 \text{ pu}$$

Figura 45. **Reducción para obtener la impedancia de Thévenin en barra 7**



Fuente: elaboración propia.

Corriente de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{0,43} = 2,32 \text{ pu}$$

$$I_{cc_{base}} = \frac{30\,000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0,480 \text{ kV}} = 36\,084,39 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 2,32 \text{ pu} * 36\,084,39\text{A} = 83,714 \text{ kA}$$

La potencia de cortocircuito trifásica simétrica será:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 0,480 \text{ kV} * 83,714 \text{ kA} = 69,6 \text{ MVA}$$

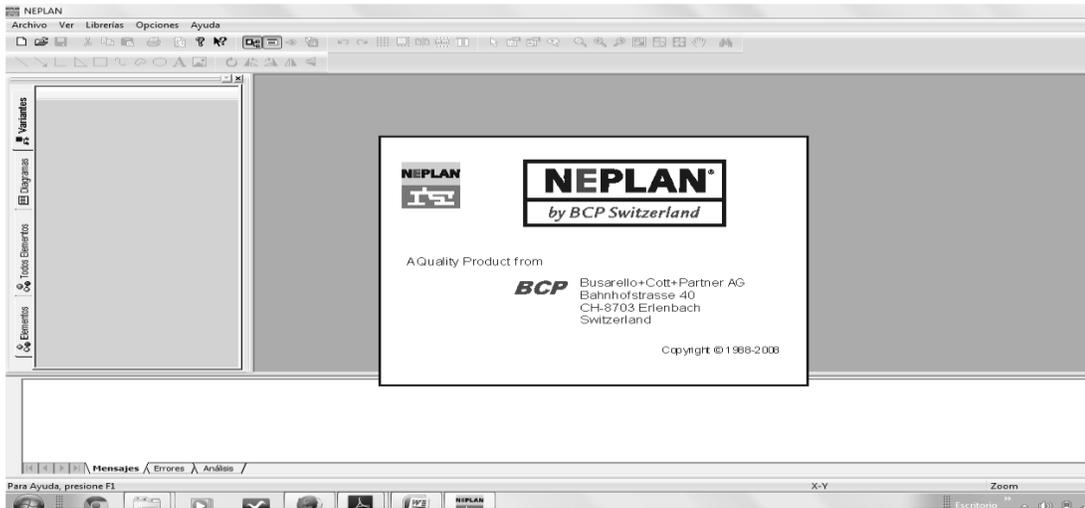
4.2. Programa de simulación NEPLAN, sistema de planeamiento y optimización de redes eléctricas, como herramienta de ayuda

NEPLAN Power System Analysis, este paquete computacional es una de las más completas herramientas de planeamiento, optimización y simulación de sistemas eléctricos de potencia. NEPLAN es una herramienta de dibujo y análisis de sistemas de distribución eléctrica, que permite de una manera fácil y flexible crear y modificar diagramas unifilares.

4.2.1. Módulo de cortocircuito de NEPLAN

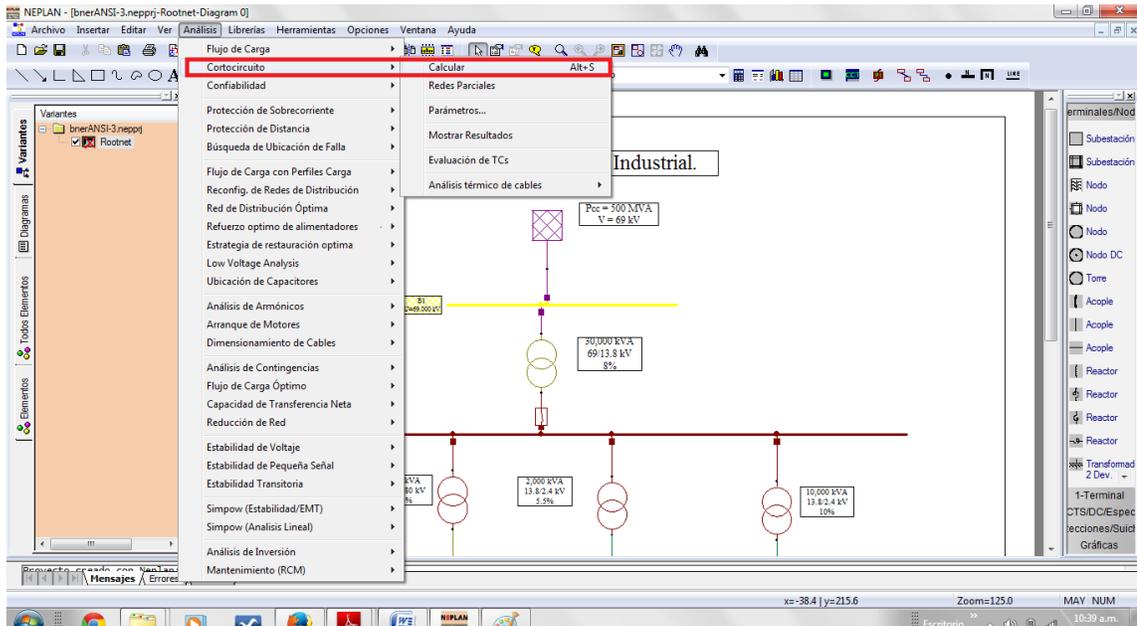
Para realizar un estudio de cortocircuito es necesario explicar antes como funciona este módulo del programa NEPLAN para simular los respectivos fallos en la red con que esté se trabajando. A continuación se detalla las características de este módulo. El módulo de cortocircuito se ubica mediante análisis en la barra de menú, dejando inmóvil el cursor sobre esta opción, aparece otro menú donde se puede observar las siguientes opciones.

Figura 46. Arranque del programa NEPLAN



Fuente: software NEPLAN.

Figura 47. Módulo de cortocircuito NEPLAN



Fuente: software NEPLAN.

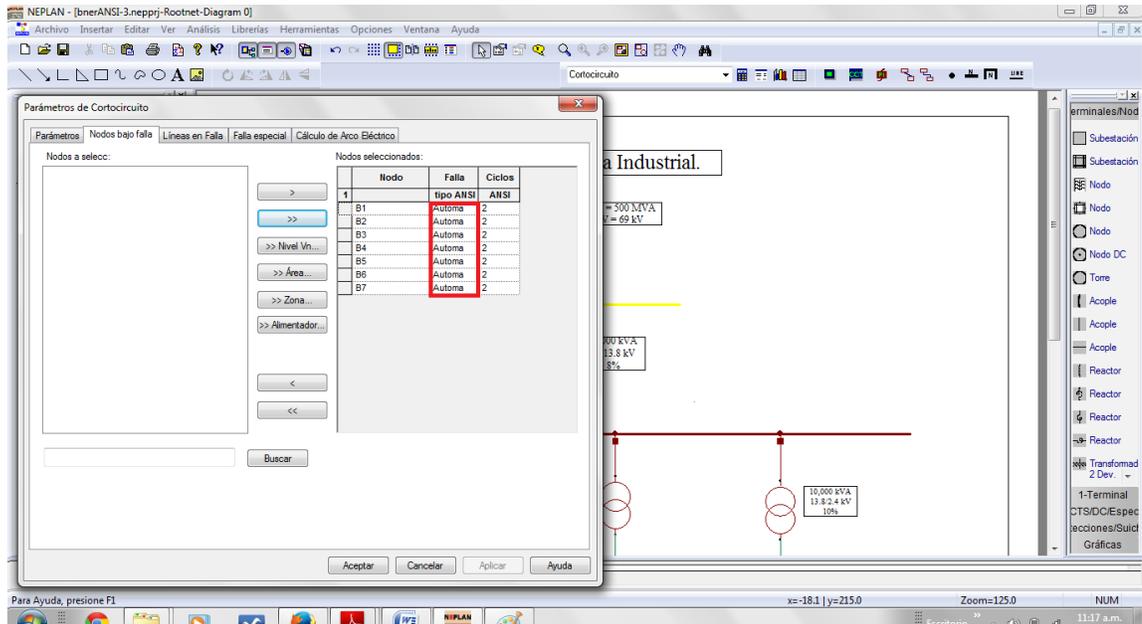
- Calcular: al seleccionar calcular se utiliza para ejecutar el cálculo o análisis respectivo. Antes de correr una simulación se debe revisar la opción parámetros para verificar que todos los parámetros de cálculo estén correctos.
- Redes parciales: para algunos módulos es posible ejecutar el cálculo solo para las redes parciales deseadas. Una red parcial es una red que no está conectada a otra, por ejemplo, a líneas abiertas. El programa despliega una lista de todas las redes parciales existentes, y el usuario puede seleccionar las que desea que se incluyan en el cálculo.
- Parámetros: este segmento permite hacer ajuste antes de realizar el cálculo. Pudiendo tener acceso a todos los parámetros utilizados en el análisis respectivo se puede activar opciones adicionales y hacer ajustes para los datos de iteración. Esta opción presenta una ventana de diálogo, de la cual se puede elegir, nodos bajo falla, fallas en línea, fallas especiales.

Nodos bajo falla.

En este caso se utiliza este método para seleccionar el o los nodos en que se simulara una falla; esto puede ser seleccionado a partir de una lista de los nodos en la red, por el nivel de tensión, por el área o la zona a la que pertenecen, o por el alimentador que tenga conectado.

En este caso debido a que la red está alimentada por una sola fuente se debe seleccionar el tipo de red automática. Como se muestra en la figura 48.

Figura 48. Selección de red automática NEPLAN

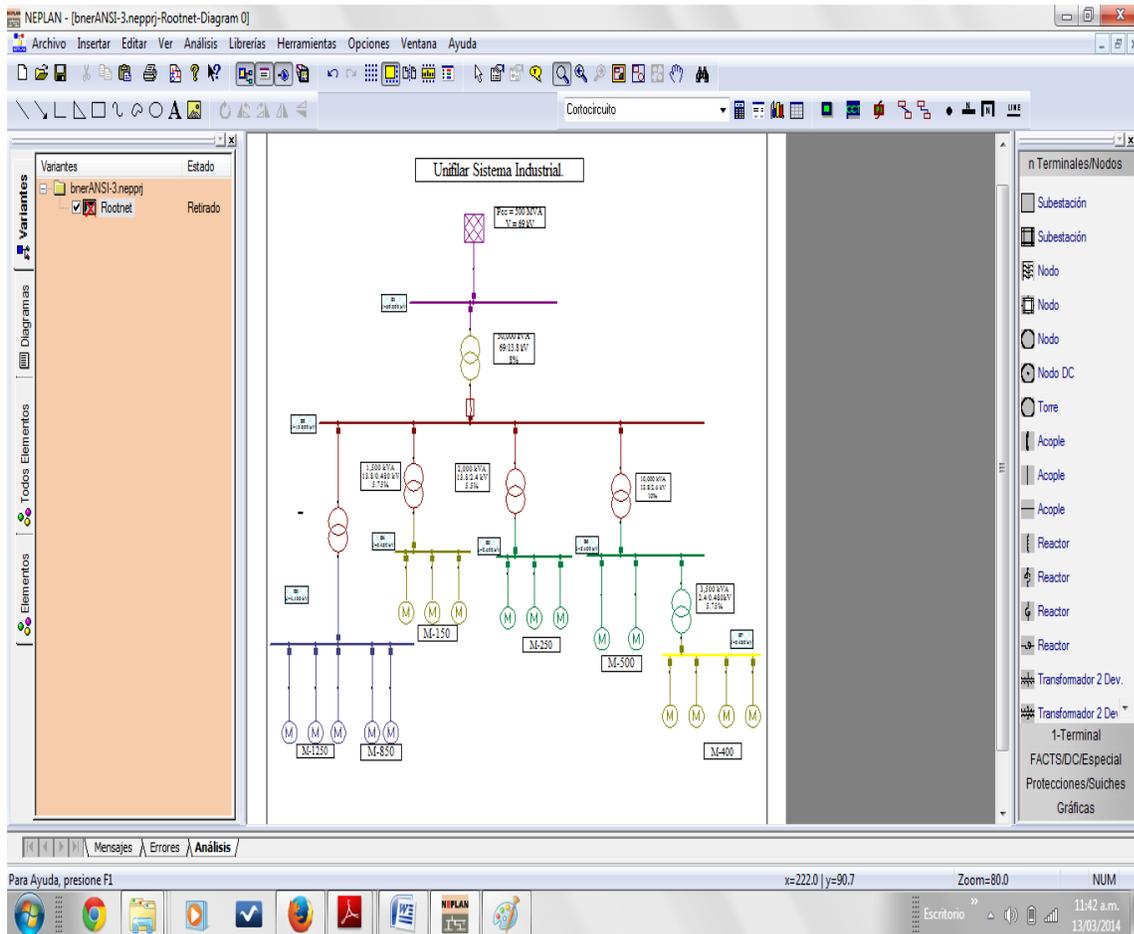


Fuente: software NEPLAN.

4.3. Análisis del caso de estudio

En la figura 49 se muestra el unifilar del sistema de potencia industrial que se sometió a las pruebas de cortocircuito. Se ha simulado a nivel de 69kV, así como se ha simulado las interconexiones con el resto de barras del sistema industrial.

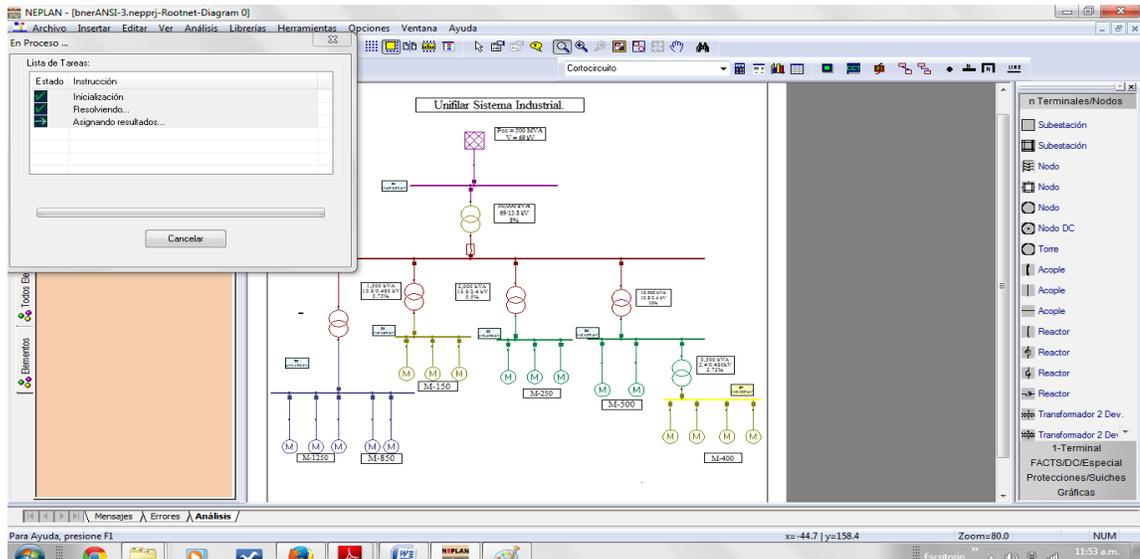
Figura 49. Unifilar del sistema industrial hecho en NEPLAN



Fuente: software NEPLAN.

Se procede a realizar el cálculo de cortocircuito en cada barra seleccionando análisis y seleccionando calcular, el programa procede a realizar los cálculos pertinentes en las barras, como se muestra en la figura 50.

Figura 50. Cálculo de cortocircuito a barras del sistema industrial



Fuente: software NEPLAN.

Los resultados son los siguientes obtenidos de la simulación que realiza el programa NEPLAN. Como se puede apreciar en la figura 51.

Figura 51. Resultado de cortocircuito a barras del sistema industrial

ID	Ubicación de Falla	Vn	Ik*(RST)	Falla	Máximo	Red	Duración CC (Idc)	Descripción	Zona	Área	Red Parcial
		kV	kA	tipo	corrient	tipo	ciclos				Red
1	283	B2	13.800	13.11	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
2	286	B4	0.480	40.1	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
3	285	B3	4.160	24.51	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
4	284	B1	69.000	5.000	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
5	174257	B6	2.400	27.91	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
6	174289	B7	0.480	83.95	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1
7	33703	B5	2.400	11.47	Falla Trifá	<input checked="" type="checkbox"/>	GEN.LEJA	3	Zone 1	Area 1	1

Fuente: software NEPLAN.

4.4. Comparación de resultados

Utilizando un solo sistema eléctrico industrial, para el análisis del cortocircuito, para comprobar los resultados de los cálculos obtenidos aplicando el método equivalente de Thévenin, permitiendo efectuar una comparación en lo que respecta a los datos necesarios para desarrollar el cálculo y los resultados obtenidos al final del procedimiento se pueden comparar con los obtenidos con el simulador NEPLAN.

Aplicando el método de equivalente de Thévenin, este resulta sencillo en el desarrollo, cuando se trata de analizar puntos en un sistema que no es muy grande la reducción es bastante rápida. Por otro lado, si el sistema comprende un gran número de nodos, las reducciones se vuelven complicadas y el procedimiento es muy laborioso, invirtiendo mucho tiempo en el desarrollo del procedimiento, este método se convierte en una herramienta poco práctica.

Tabla VII. **Datos de resultados obtenidos de simulación NEPLAN**

Comparación de Resultados.		
Barra	Icc calculada por el método de Thévenin (kA)	Icc calculada por el simulador NEPLAN (kA)
1	4.92	5
2	13.06	13.8
3	24.48	24.51
4	39.94	40.1
5	11.4	11.47
6	27.64	27.91
7	83.71	83.95

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos por medio de los cálculos del método de Equivalente de Thévenin. Comparado con los resultados obtenidos de la simulación se puede apreciar magnitudes de cortocircuito similares, considerando que si es necesario el redondeo de las magnitudes y que es necesario contemplar más de 6 espacios decimales para obtener una diferencia despreciable entre resultados a la hora de realizar los cálculos.

Este estudio está enfocado al análisis del cortocircuito del sistema industrial, como se puede comparar los resultados obtenidos de ambos cálculos, el simulador se puede redondear decimales en comparación con el método de Thévenin, la variación de ambos métodos no es muy grande.

Se puede comprobar que el método de Thévenin si es efectivo, comparado con los resultados de la simulación por el programa NEPLAN.

CONCLUSIONES

1. Las protecciones eléctricas son necesarias, para el buen funcionamiento del sistema eléctrico en la industria, para evitar percances a los circuitos eléctricos que lo conforman.
2. El cálculo de las corrientes de cortocircuito, aporta información importante para determinar el tipo de protección y el ajuste que debe de llevar el equipo de protección.
3. La coordinación de las protecciones eléctricas es importante, para verificar que los dispositivos de protección trabajen apropiadamente, de tal manera que no se interrumpa el servicio innecesariamente.
4. En el caso del estudio del sistema eléctrico industrial se pudo realizar los cálculos de corto circuito al diagrama eléctrico, aplicando el método equivalente de Thévenin, corroborando resultados con el programa NEPLAN.

RECOMENDACIONES

1. Al analizar el sistema eléctrico industrial se tiene que tener bien definidos los equipos de protección a instalar, por eso es de suma importancia realizar un diseño acorde a las necesidades del sistema eléctrico.
2. Realizar el análisis de cortocircuito en la industria es importante determinar el tipo de corriente que puede soportar el equipo de protección, así evitar fallas y pérdidas económicas de grandes proporciones por un mal diseño de protecciones.
3. Tener claro los conocimientos de la coordinación del equipo de protección, para mantener la confiabilidad e integridad en el sistema eléctrico industrial, de tal manera que sea el dispositivo que este más cercano a la falla quien la libere.
4. Darle un mayor provecho a el programa NEPLAN, al aplicarlo a casos de estudio del sistema eléctrico, de esta manera brindarle a los estudiantes universitarios más opciones que sirvan de refuerzo a la preparación y hacer más didáctico el proceso de aprendizaje.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.C; Gaudio. *Criterio de ajuste y coordinación del sistema de protección*. Perú: SEIN Transen S. A., 2008. 125 p.
2. _____. *Requerimiento de protección del SEIN*. Perú: SEIN Transen S. A., 2008. 110 p.
3. MARGIL S.; RAMÍREZ ALANÍS, M. *Protección de sistemas eléctricos de potencia*. Universidad autónoma de nuevo león (U.A.N.L), Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica, 2005. 134 p.
4. MURJAL ROSAS, Ramón M. *Cálculo de líneas y redes eléctricas*. Edición de la Universidad de Cataluña. 1997. 102 p.
5. RODRÍGUEZ, M. *Análisis de sistema de Potencia*. España: Ediluz, 1992. 192 p.
6. Software de Acceso gratis NEPLAN. [en línea] <http://www.neplan.ch>. [Consulta: octubre de 2013].

