

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEC 60909-0 Y
ANSI/IEEE 141-4 PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE
CORTOCIRCUITO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO
FINAL EMPLEANDO LOS SIMULADORES DIGSI-ENT
POWERFACTORY Y ETAP.**

Isabel Cristina Choachi Gómez
Álvaro Javier López Loaiza

Pereira, Septiembre de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Programa de ingeniería Eléctrica



Estudio Comparativo de las Normas IEC 60909-0 y ANSI/IEEE 141-4 PARA EL Cálculo de Corrientes de Cortocircuito en Instalaciones Eléctricas de uso Final Empleando los Simuladores Digsilent Powerfactory Y Etap.

©Isabel Cristina Choachi Gómez

©Álvaro Javier López Loaiza

Director: Jorge Humberto Sanz Alzate

Pereira, Septiembre de 2017
Programa de ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
La Julita. Pereira (Colombia)
TEL: (+57) (6)3137122
www.utp.edu.co
Versión web disponible en:

Dedicatoria.

Dedico este trabajo de grado a mi familia, ellos son lo más importante en mi vida, son el motor que me impulsa a ser mejor cada día. A mi padre (Álvaro López), a mi madre (Ana Loaiza) por su apoyo incondicional y el enseñarme que con dedicación, esfuerzo y amor las metas se pueden alcanzar, a mis hermanas (Johanna y Angie Ximena) por su apoyo, compañía y alegría, pues sus sonrisas son una motivación y alegría todos los días.

Álvaro Javier López Loaiza.

Dedico este trabajo de grado a mi madre (María Isabel Gómez C.), a mi padre (Guillermo Choachi S.), que gracias a su consejo, esfuerzo y dedicación, nos formaron bajo buenos valores y con su ejemplo me motivaron a que fuera la persona que soy hoy y lograr este nuevo logro, a mis hermanas (Deysi Tatiana choachi y Claudia Lorena Choachi) que gracias a su presencia, risas y ejemplo hacen de mí una mejor persona. A mi novio (Victor Zapata) ya que gracias a su consejo y motivación me hace crecer como futura profesional y como ser humano.

Isabel Cristina Choachi Gómez.

Agradecimientos

Agradeceos a Dios por la vida, la salud y la por darnos la capacidad para afrontar los problemas y querer superarnos día a día.

Agradecemos a cada una de las personas que hicieron parte de esta meta, profesores y compañeros que con su acompañamiento hicieron más agradable nuestro paso por la universidad tecnológica de Pereira.

Agradecemos al ingeniero Jorge Humberto Sanz por su consejo, tiempo y dedicación en la elaboración de este proyecto.

ÍNDICE DE GENERAL

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE GENERAL.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
2. CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO	6
2.1. INTRODUCCIÓN.....	6
2.2. TIPOS DE CORTOCIRCUITO	7
2.2.1 <i>Cortocircuito trifásico simétrico</i>	7
2.2.2 <i>Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra</i>	7
2.2.3 <i>Cortocircuito bifásica a Tierra</i>	8
2.2.4 <i>Cortocircuito monofásica a Tierra</i>	8
2.2.5 <i>Cortocircuito con doble contacto a tierra</i>	9
2.3. COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	9
2.4. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	12
2.4.1 <i>Máxima y mínima corriente de cortocircuito</i>	12
2.4.2 <i>Corrientes simétricas y corrientes asimétricas</i>	13
3. CAPÍTULO 3 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SEGÚN IEC 60909-0	16
3.1. LA IEC (COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL)	16
3.2. LA NORMA IEC 60909-0.....	16
3.2.1 <i>Definición del tipo de falla</i>	17
3.2.2 <i>Cálculo de la tensión equivalente en el punto de falla</i>	19
3.2.3 <i>Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directas, inversas y homopolares, aguas arriba del punto de falla</i>	21
3.2.4 <i>Calculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas</i>	22
3.2.5 <i>Cálculos a partir del valor de (I_k)</i>	23
4. CAPÍTULO 4 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SEGÚN ANSI/IEEE 141-4	29
4.1. SISTEMAS EN POR UNIDAD	29
4.2. PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	31

4.2.1	<i>Paso 1: Preparar los diagramas del sistema</i>	31
4.2.2	<i>Paso 2: Reunir y Convertir los datos de Impedancia</i>	31
4.2.3	<i>Paso 3: Combinar Impedancias</i>	32
4.2.4	<i>Paso 4: Calcular la corriente de Cortocircuito</i>	34
5.	CAPÍTULO 5 ANALICIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGIAS IEC Y ANSI/ IEEE PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	44
5.1	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE LAS NORMAS IEC Y ANSI/IEEE PARA EL ESTUDIO COMPARATIVO 44	
5.1.1	<i>Corrientes y esfuerzos IEC y ANSI/IEEE</i>	45
5.1.2	<i>Aspectos de modelación del decaimiento de AC</i>	45
5.1.3	<i>Aspectos de modelación del decaimiento de DC</i>	45
5.1.4	<i>Tensiones de prefalla</i>	46
6.	CAPÍTULO 6 PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGIA PARA EL ANALICIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL.....	47
6.1	CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE USO FINAL	47
6.1.1	<i>Clasificación según el capítulo 8 del reglamento de instalaciones eléctricas (RETIE)</i>	47
6.1.2	<i>Clasificación según el capítulo 10 del reglamento de instalaciones eléctricas (RETIE)</i>	48
6.2	DIAGRAMA DE FLUJO REPRESENTATIVOS DE PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL.....	51
6.3	OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO NECESARIOS PARA UN CORRECTO CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	54
6.3.1	<i>Elaboración de un diagrama unifilar de la instalación eléctrica de uso final</i>	54
6.4	ELECCIÓN DE CONDUCTORES: CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE USO OBLIGATORIO SEGÚN EL RETIE 57	
6.4.1	<i>Conductores para instalaciones de uso final: interiores</i>	58
6.4.2	<i>Conductores para instalaciones de uso final: acometidas</i>	61
6.4.3	<i>Conductores para instalaciones de uso final: media tensión</i>	61
6.5	PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	62
6.5.1	<i>Fusibles para protección de transformadores</i>	62
6.5.2	<i>Fusibles para protección de ramales</i>	63
6.5.3	<i>Los interruptores automáticos</i>	63
6.6	DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE FALLA.....	65
7.	CAPÍTULO 7 ESTUDIO Y DESARROLLO DE UN EJEMPLO PRÁCTICO DE ANÁLISIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO IMPLEMENTANDO LOS SIMULADORES DIGSILENT POWERFACTORY Y ETAP.....	67
7.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO DE LA INSTALACIONES ELÉCTRICA DE PRUEBA	67
7.2	ANÁLISIS INICIAL DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE PRUEBA SEGÚN NORMATIVIDAD COLOMBIANA.....	68
7.3	ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA UNIFILAR DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE PRUEBA	70
7.3.1	<i>Reducción del diagrama unifilar de la instalación eléctrica de prueba</i>	71
7.4	DATOS DE IMPEDANCIAS DEL SISTEMA.....	71
7.4.1	<i>Alimentación</i>	72
7.4.2	<i>Fusible</i>	72
7.4.3	<i>Transformador</i>	72
7.4.4	<i>Conductores</i>	72
7.5	CASOS DE ESTUDIO	74
7.6	SIMULACIÓN REALIZADA EN LSPS DE LG	75

7.7	SIMULACIÓN REALIZADA EN MELSHORT DE MITSUBISHI ELECRIE	84
7.8	SIMULACIÓN REALIZADA EN ETAP	91
7.9	SIMULACIÓN REALIZADA EN DIGSILEN	97
7.10	RESULTADOS	102
8.	CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
8.1	CONCLUSIONES GENERALES.	106
8.2	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.	108
8.3	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.	109
	BIBLIOGRAFÍA	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Cortocircuito trifásico simétrico	7
Figura 2-2 Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra	7
Figura 2-3 Cortocircuito bifásica a Tierra	8
Figura 2-4 Cortocircuito monofásica a Tierra	8
Figura 2-5 Cortocircuito con doble contacto a tierra	9
Figura 2-6 Componentes de secuencia cero	10
Figura 2-7 Componentes de secuencia positiva	10
Figura 2-8 Componentes de secuencia negativa	11
Figura 2-9 Esquema simplificado de una red	13
Figura 2-10 Representación gráfica y descomposición de la corriente de un cortocircuito producido en un punto alejado del alternador.	14
Figura 2-11 Presentación gráfica del caso extremo de una corriente de cortocircuito simétrica.	15
Figura 2-12 Presentación gráfica del caso extremo de una corriente de cortocircuito asimétrica. ...	15
Figura 3-1 Corriente de cortocircuito de una falla alejada del generador (IEC 60909-0 Edición 2001)	18
Figura 3-2 Corriente de cortocircuito de una falla cercana al generador (IEC 60909-0 Edición 200)	18
Figura 3-3 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito I''_k de acuerdo con el procedimiento de tensión de la fuente (IEC 60909-0 Edición 2001)	21
Figura 3-4 Factor K para circuitos en serie como función de la relación R/X o X/R (IEC 60909-0 Edición 2001)	24
Figura 3-5 Factor μ para el cálculo de la corriente de cortocircuito de corte I_b (IEC 60909-0 Edición 2001)	25
Figura 3-6 Factores $\lambda_{\text{máx}}$ y $\lambda_{\text{mín}}$ para turbogeneradores (IEC 60909-0 Edición 2001)	26
Figura 3-7 Factores $\lambda_{\text{máx}}$ y $\lambda_{\text{mín}}$ para máquinas de polos salientes (IEC 60909-0 Edición 2001). 26	26
Figura 4-1 Configuración de impedancias de estrella a delta	33
Figura 4-2 Configuración de impedancias de delta a estrella.	34
Figura 4-3 Factores multiplicativos (capacidades basados en la corriente rms total) para fallas trifásicas (local)	40
Figura 4-4 Factores multiplicativos (capacidades basados en la corriente rms total) para fallas trifásicas y de línea a tierra (local)	40
Figura 4-5 Factores multiplicativos para fallas trifásicas	41
Figura 4-6 Factores multiplicativos para fallas trifásicas y de línea a tierra	42
Figura 6-1 La Análisis inicial de instalaciones eléctricas de uso final según normatividad colombiana	52
Figura 6-2 Análisis inicial de instalaciones eléctricas de uso final según normatividad colombiana	53
Figura 6-3 Diagrama de Flujo para cálculo de corrientes de cortocircuito según IEC60909-0	53
Figura 6-4 Diagrama de Flujo para cálculo de corrientes de cortocircuito según ANSI/IEEE 141-454	63
Figura 6-5 Interruptores automáticos	63
Figura 6-6 Curvas de disparo	65
Figura 7-1 Diagrama unifilar de la instalación eléctrica de prueba	70
Figura 7-2 Diagrama unifilar simplificado de la instalación eléctrica de prueba	71

Figura 7-3 Barra de herramientas LSPS.....	75
Figura 7-4 Icono Drawing- LSPS.....	76
Figura 7-5 la barra de herramientas Control Manager –LSPS	76
Figura 7-6 Ventana de edición. Red equivalente al sistema de distribución. – LSPS.....	77
Figura 7-7 Icono SC Calculation. LSPS.....	78
Figura 7-8 el icono CB Auto Selection. LSPS	78
Figura 7-9 Ventana de edición de Protecciones. – LSPS.	79
Figura 7-10 Opción TC- Curve – LSPS	80
Figura 7-11 Curvas tiempo corriente – LSPS	80
Figura 7-12 Opción de coordinación de protecciones – LSPS.....	81
Figura 7-13 Diagrama unifilar caso 1 – LSPS	82
Figura 7-14 Diagrama unifilar caso 2 – LSPS	82
Figura 7-15 Coordinación de protecciones – LSPS	83
Figura 7-16 Configuración de frecuencia des sistema y espacio de trabajo paso 1 - Melshort.....	84
Figura 7-17 Configuración de frecuencia des sistema y espacio de trabajo paso 2 – Melshort.....	84
Figura 7-18 Opción Drawing – Melshort.....	85
Figura 7-19 Barras de herramientas Element bar – Melshort.....	85
Figura 7-20 Barras de herramientas Co- coordination bar – Melshort.....	85
Figura 7-21 Opción Check skleton- Melshort.....	86
Figura 7-22 Opción calculation – Melshort.	86
Figura 7-23 Ventana de edición de Protecciones. – LSPS.	87
Figura 7-24 Opción créate a co-ordination.....	88
Figura 7-25 Curva tiempo corriente – Melshort.....	88
Figura 7-26 Diagrama unifilar caso 1 – Melshort.....	89
Figura 7-27 Diagrama unifilar caso 2 – Melshort.....	89
Figura 7-28 Coordinación de protecciones – Melshort.....	90
Figura 7-29 Barra de herramientas – Etap.....	91
Figura 7-30 Barra de elementos eléctricos – ETAP	91
Figura 7-31 Barra de herramientas de cortocircuito –ETAP.....	92
Figura 7-32 Barra de herramientas de coordinación de protecciones – ETAP.	93
Figura 7-33 Barra de herramientas para caso de estudio.....	93
Figura 7-34 Ventana de edicion de caso de estudio - ETAP.....	93
Figura 7-35 Diagrama unifilar caso 1 – ETAP.....	94
Figura 7-36 Diagrama unifilar caso 2 – ETAP.....	94
Figura 7-37 Diagrama unifilar caso 3 – ETAP.....	95
Figura 7-38 Diagrama unifilar caso 4 – ETAP.....	95
Figura 7-39 Coordinación de protecciones – ETAP.	96
Figura 7-40 Barra de herramientas Digsilent (Ubicada a la derecha)	97
Figura 7-41 Ventana para la configuración de transformadores Digsilent.....	98
Figura 7-42 Ventana para la configuración de transformadores Digsilent.....	98
Figura 7-43 Barra de herramientas Digsilent parte superior	99
Figura 7-44 Ventana para la configuración de modo de falla de cortocircuito Digsilent	99
Figura 7-45 Diagrama unifilar caso 1 y 3 – Digsilent.....	100
Figura 7-46 Diagrama unifilar caso 2 4 – Digsilent.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 FACTOR C DE TENSIÓN.....	20
Tabla 3-2 VALOR DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN FUNCIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR DE UNA RED.	22
Tabla 3-3 FACTOR DE TENSIÓN C PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MÁXIMAS Y MÍNIMAS.....	27
Tabla 4-1 MULTIPLICADORES DE REACTANCIA (O IMPEDANCIA) PARA MAQUINAS ROTATIVAS	36
Tabla 4-2 MULTIPLICADORES DE REACTANCIA (O IMPEDANCIA) PARA MAQUINAS ROTATIVAS PARA UNA RED COMBINADA	37
Tabla 4-3 DEFINICIÓN DE TIEMPO MÍNIMO DE APERTURA DE CONTACTOS PARA INTERRUPTORES DE C.A. DE ALTA TENSIÓN.....	41
Tabla 5-1 CORRIENTES Y ESFUERZOS IEC Y ANSI/IEEE	45
Tabla 6-1 ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS DE COMÚN UTILIZACIÓN DEL RETIE	55
Tabla 6-2 ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS DE COMÚN UTILIZACIÓN DEL RETIE	55
Tabla 6-3 SÍMBOLOS ELÉCTRICOS PARA ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS UNIFILARES	56
Tabla 6-4 CONDUCTORES PARA INSTALACIONES INTERIORES.....	58
Tabla 6-5 CALIBRE MÍNIMO DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS PARA PUESTA A TIERRA DE CANALIZACIONES Y EQUIPOS.	59
Tabla 6-6 CAPACIDAD DE CORRIENTE PERMISIBLE EN CONDUCTORES AISLADOS PARA 0 A 2 000 V NOMINALES Y 60 °C A 90 °C. NO MÁS DE TRES CONDUCTORES PORTADORES DE CORRIENTE EN UNA CANALIZACIÓN, CABLE O TIERRA (DIRECTAMENTE ENTERRADOS) Y TEMPERATURA AMBIENTE DE 30 °C.	60
Tabla 6-7 CONDUCTORES DE ACOMETIDA.....	61
Tabla 6-8 CONDUCTORES PARA MEDIA TENSIÓN	61
Tabla 6-9 CALIBRES MÍNIMOS SE ESTABLECEN PARA LOS DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN.....	61
Tabla 6-10 Longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección....	64
Tabla 7-1 DATOS DE CARGAS DE APARTAMENTOS	68
Tabla 7-2 Calibres de los conductores seleccionados para la instalación eléctrica de prueba.	72
Tabla 7-3 Impedancias de cables usados para la instalación eléctrica de prueba.....	73
Tabla 7-4 Verificación de la longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección.	73
Tabla 7-5 Casos de estudio.....	74
Tabla 7-6 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN EN LSPTS.....	77
Tabla 7-7 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN MELSHORT	85
Tabla 7-8 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN ETAP	92
Tabla 7-9 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN DIGSILENT.	97
Tabla 7-10 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 1 con la norma IEC 60909	102

Tabla 7-11 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 2 con la norma IEC 60909	103
Tabla 7-12 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 1 y 2 con la norma ANSI/IEE 141	104

GLOSARIO

- **Acometida:** Derivación de la red local del servicio respectivo, que llega hasta el registro de corte del inmueble. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general. En aquellos casos en que el dispositivo de corte esté aguas arriba del medidor se entenderá la acometida como el conjunto de conductores y accesorios entre el punto de conexión eléctrico al sistema de uso general (STN, STR o SDL) y los bornes de salida del equipo de medición.
- **Arco eléctrico:** Haz luminoso producido por el flujo de corriente eléctrica a través de un medio aislante, que produce radiación y gases calientes.
- **Alta concentración de personas u ocupación para reuniones públicas:** Cuando se pueden concentrar 50 o más personas, según **NFPA 101** (Código de seguridad humana) pero no limitado a este número, con el fin de desarrollar actividades tales como: trabajo, deliberaciones, comida, bebida, diversión, espera de transporte, culto, educación, salud o entretenimiento.
- **Cable:** Conjunto de alambres sin aislamiento entre sí y entorchado por medio de capas concéntricas.
- **Circuito eléctrico:** Lazo cerrado formado por un conjunto de elementos, dispositivos y equipos eléctricos, alimentados por la misma fuente de energía y con las mismas protecciones contra sobretensiones y sobrecorrientes. No se toman los cableados internos de equipos como circuitos. Pueden ser de modo diferencial (por conductores activos) o de modo común (por conductores activos y de tierra).
- **Componente decreciente (aperiódica) i_{dc} de la corriente de cortocircuito:** Valor medio entre las envolventes superior e inferior de una corriente de cortocircuito decreciente desde un valor inicial hasta cero.
- **Conductor neutro:** Conductor activo conectado intencionalmente al punto neutro de un transformador o instalación y que contribuye a cerrar un circuito de corriente.
- **Circuito eléctrico equivalente:** Modelo para describir el comportamiento de un circuito eléctrico, por medio de una red de elementos ideales.
- **Corriente eléctrica:** Es el movimiento de cargas eléctricas entre dos puntos que no se hallan al mismo potencial, por tener uno de ellos un exceso de electrones respecto al otro.

- **Corriente de cortocircuito:** Sobre intensidad resultante de un cortocircuito debido a una falla o a una conexión incorrecta en un sistema eléctrico.
- **Corriente de cortocircuito previa (disponible):** corriente que circula si el cortocircuito fuera remplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable sin ningún cambio en la alimentación.
- **Corriente de cortocircuito asimétrica:** valor eficaz de la componente simétrica de corriente alterna de una corriente de cortocircuito previa (disponible), siendo despreciada la componente de corriente continua, si existe.
- **Corriente de cortocircuito simétrica inicial I''_K :** valor eficaz de la componente simétrica de corriente alterna de una corriente de cortocircuito prevista (disponible), aplicable en el instante de cortocircuito si la impedancia permanece en el valor del instante cero.
- **Corriente de cortocircuito simétrica de corte i_b :** Valor eficaz de un ciclo integral de la componente simétrica de corriente alterna de la corriente de cortocircuito prevista, en el instante de separación de los contactos del primer polo que abre de un dispositivo de interrupción.
- **Corriente de cortocircuito permanente I_K :** Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece después del decrecimiento del fenómeno transitorio
- **Cortocircuito:** Camino conductor de muy baja resistencia accidental o intencionado entre dos o más partes conductoras de diferente potencial, que fuerza a que la diferencia de potencial entre ellas sea igual o próxima a cero.
- **Cortocircuito bifásico:** camino conductor accidental o intencionado entre dos o más conductores de fase con o sin conexión a tierra.
- **Cortocircuito monofásico a tierra:** camino conductor accidental o intencionado entre un conductor de fase y tierra local, en un sistema con neutro puesto a tierra sólidamente o a través de una impedancia
- **Cortocircuito alejado de un alternador:** Cortocircuito durante el cual la magnitud de la componente simétrica de corriente alterna de la corriente de cortocircuito prevista (disponible) permanece e esencialmente constante.
- **Cortocircuito próximo a un alternador:** Cortocircuito en el que la contribución, de al menos una máquina síncrona, a la corriente de cortocircuito simétrica inicial prevista, es más del doble de la corriente asignada de la máquina síncrona, o en el que la contribución de los motores asíncronos supera el 5% de la corriente de cortocircuito simétrica inicial I''_K sin motores.

- **Diagrama unifilar:** Representación gráfica integral y sencilla de un sistema eléctrico, el cual está compuesto por fuentes generadoras, transformadores, circuitos alimentadores, protecciones
- **Falla franca:** cero impedancia en el punto de cortocircuito
- **Factor de tensión c :** Relación entre la fuente de tensión equivalente y la tensión nominal del sistema U_n dividida por $\sqrt{3}$.
- **Impedancia de cortocircuito de secuencia directa $Z_{(1)}$ de un sistema trifásico de corriente alterna:** Impedancia del sistema de secuencia directa vista desde el punto de cortocircuito.
- **Impedancia de cortocircuito de secuencia inversa $Z_{(2)}$ de un sistema trifásico de corriente alterna:** Impedancia del sistema de secuencia inversa vista desde el punto de cortocircuito.
- **Impedancia de cortocircuito homopolar $Z_{(0)}$ de un sistema trifásico de corriente alterna:** Impedancia del sistema homopolar vista desde el punto de cortocircuito. Incluye el triple de la impedancia de puesta a tierra de los neutros Z_N .
- **Impedancia de cortocircuito Z_K de un sistema trifásico de corriente alterna:** Expresión abreviada de la impedancia de cortocircuito de secuencia directa $Z_{(1)}$.
- **Nominal:** Término aplicado a una característica de operación, indica los límites de diseño de esa característica para los cuales presenta las mejores condiciones de operación. Los límites siempre están asociados a una norma técnica.
- **Norma técnica colombiana (NTC):** Norma técnica aprobada o adoptada como tal por el organismo nacional de normalización.
- **Operador de red:** Empresa de Servicios Públicos encargada de la planeación, de la expansión y de las inversiones, operación y mantenimiento de todo o parte de un Sistema de Transmisión Regional o un Sistema de Distribución Local.
- **Pequeño comercio o industria:** Para efectos del presente reglamento, se entenderá como pequeño comercio aquel que tenga una capacidad instalable menor a 10 kVA y una área no mayor a 50 m² y pequeña industria aquella con una capacidad instalable menor a 20 kVA.
- **Potencia de cortocircuito simétrica inicial S_K'' :** Valor ficticio determinado como el producto de la corriente de cortocircuito simétrica inicial I_K'' , por la tensión nominal del sistema U_n y por el factor $\sqrt{3}$. $S_K'' = \sqrt{3} * U_n * I_K''$

- **Reglamento técnico:** Documento en el que se establecen las características de un producto, servicio o los procesos y métodos de producción, con inclusión de las disposiciones administrativas aplicables y cuya observancia es obligatoria.
- **RETIE:** Acrónimo del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas adoptado por Colombia.
- **Sobrecarga:** Funcionamiento de un elemento excediendo su capacidad nominal.
- **Sobretensión:** Tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema.
- **Tablero:** Encerramiento metálico o no metálico donde se alojan elementos tales como aparatos de corte, control, medición, dispositivos de protección, barrajes, para efectos de este reglamento es equivalente a panel, armario o cuadro.
- **Tensión:** La diferencia de potencial eléctrico entre dos conductores, que hace que fluyan electrones por una resistencia. Tensión es una magnitud, cuya unidad es el voltio; un error frecuente es hablar de “voltaje”.
- **Tensión nominal de un sistema U_n :** Tensión (fase-fase) por la cual un sistema es designado y a la cual están referidas ciertas características de operación.
- **Tierra (Ground o earth):** Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a conexiones con tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término “masa” sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos y los carros.
- **Valor de creta de la corriente de cortocircuito i_p :** valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito prevista (disponible).
- **X/R en el Punto de Falla:** Es la relación entre la reactancia y la resistencia en el punto de localización de la falla. Para su determinación se usará un procedimiento diferente dependiendo de la norma (ANSI/I EEE o IEC) que se use para el cálculo de falla.

RESUMEN

Este trabajo busca analizar los conceptos fundamentales del cálculo de las corrientes de corto circuito y elaborar una metodología clara regida por la normatividad colombiana y a su vez fundamentada por las normas internacionales IEC 60909 y ANSI/IEE 141.

Para esto se desarrollan y analizan por separado de las normas IEC 60909 y ANSI/IEE 141, para distinguir los conceptos claves y relevantes que a su vez sirven para establecer las diferencias entre modelos que estas plantean, la información demandada por cada uno, sus procedimientos y los resultados obtenidos al aplicar las dos normas en un sistema eléctrico de prueba. Para facilitar los cálculos se utilizaron los software de simulación de sistemas eléctricos Etap y Digsilen power factory, en los cuales se simula un sistema eléctrico de uso final Domiciliario.

En las conclusiones se destacan aquellas características y diferencias importantes de cada norma para aplicarlas según la circunstancia específica del problema, la precisión técnica requerida y la valoración del impacto socio- económico de la decisión tomada. También se sugiere la realización de trabajos futuros en esta misma línea de estudios comparativos.

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Cuando se realizan diseños de instalaciones eléctricas, se hace indispensable realizar estudios de corto circuito para determinar los niveles de corriente ante fallas, conocer estas corrientes permiten obtener información necesaria para seleccionar correctamente la capacidad de los equipos en función de los requerimientos mínimos que deben cumplir y así soportar los efectos de las contingencias, resguardando las instalaciones, además de minimizar las pérdidas técnicas y económicas que se dan por este fenómeno. Sin embargo, la presencia de fallas es una situación indeseable en un sistema eléctrico, pero lamentablemente no se pueden prever pues se presentan eventualmente teniendo diversos orígenes, por lo que ante estas condiciones, se debe estar en posibilidad de conocer las magnitudes de las corrientes de corto circuito en todos los puntos de la red.

El objetivo del análisis de corto circuito es el de calcular el valor máximo de la corrientes que se puede llegar a presentar en el momento de una contingencia y su comportamiento durante el tiempo que esta permanezca (transitorio). Esto permite determinar los equipos de protección requeridos para el valor de corriente que debe interrumpirse y conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de la corriente.

En general, se puede mencionar que un estudio de corto circuito sirve para:

- Determinar las capacidades de los dispositivos de protección como son interruptores, fusibles, entre otros.
- Realizar una adecuada coordinación de los dispositivos de protección contra las corrientes de corto circuito.
- Realizar estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de corto circuito en algunos elementos de las instalaciones como son: sistemas de barras, tableros, cables.
- Obtener los equivalentes de Thevenin y su utilización con otros estudios del sistema, como son los de estabilidad angular en los sistemas de potencia y ubicación de compensación reactiva en derivación.
- Calcular las mallas de puesta a tierra y selección de conductores para alimentadores.
- Estudios de coordinación de protecciones y selección de equipo eléctrico, entre otros.
- Establecer los valores mínimos de corriente para verificar requerimientos de respuesta a la corriente de los dispositivos de protección.

Estos estudios requieren de cálculos confiables y precisos para la determinación de corrientes de corto circuito. Actualmente existen dos normas aplicables que tienen procedimientos definidos para el cálculo de las corrientes de falla, estas son: La norma IEC 60909-0 y ANSI/IEEE 141-4.

1.2. ANTECEDENTES

En el contexto colombiano la normativa señala la importancia de realizar el análisis de corrientes de corto circuito para todo proyecto eléctrico que exija un diseño detallado según el RETIE 2013, dicho diseño detallado debe ser ejecutado por profesionales de la ingeniería cuya especialidad esté relacionada con el tipo de obra a desarrollar y la competencia otorgada por su matrícula profesional, conforme a las Leyes 51 de 1986 y 842 de 2003 [1], la norma también señala que dentro de los ítems exigido para la certificación del diseño: la profundidad con que se traten los ítems dependerá del tipo de instalación, para lo cual debe aplicar el juicio profesional del responsable del diseño, además el diseñador deberá hacer mención expresa de aquellos ítems que a su juicio no apliquen. Esto quiere decir, que la norma deja a criterio del profesional aspectos detallados del análisis de corrientes de corto circuito y señalando de manera general la exigencia de este para instalaciones eléctricas que no entren dentro de la calificación de diseño simplificado. Cuando es necesario realizar el análisis de corto circuito, existen dos procedimientos internacionales normalizados de referencia para el caso colombiano: el normalizado por la IEC (International Electrotechnical Commission), de origen europeo y el ANSI/IEEE (American National Standard Institute/IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers) de origen norteamericano. Los dos proveen resultados que sirven, entre otros usos, para seleccionar interruptores de circuito y diseñar esquemas de protección. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre ellos (modelo matemático, esfuerzos de corto circuito, procedimiento de cálculo, etc.) que originan resultados de cálculo diferentes, los cuales deberán entenderse cabalmente para evaluar el impacto técnico-económico en las aplicaciones.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Un corto circuito es un tipo de falla eléctrica que puede originar efectos sumamente peligrosos en un sistema eléctrico, este es un fenómeno transitorio, que inhabilita o reduce la capacidad de un sistema eléctrico para transportar energía, puede causar daños a equipos y en el peor de los casos afectar la vida. Es necesario entonces reducir los efectos de las fallas por corrientes de corto circuito mediante el rápido accionamiento de los dispositivos de protección aislando la instalación eléctrica y además realizar una adecuada selección de equipo eléctrico al momento de elaborar un diseño; para ello es necesario efectuar cálculos confiables y precisos para la determinación de la corriente de corto circuito.

El análisis de cortocircuito se fundamenta en el cálculo de las magnitudes de las corrientes durante una contingencia y análisis de las corrientes que afectan los elementos de la instalación. Determinar estas corrientes permite la correcta selección de conductores, la adecuada escogencia de equipos de protección de puesta a tierra y la correcta coordinación entre estos equipos de protección.

Para el caso colombiano el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) establece que toda instalación eléctrica que requiera un diseño detallado debe contar con el respectivo análisis de corrientes de corto circuito y falla a tierra, además se hace énfasis en que este debe ser realizado por un profesional o profesionales legalmente competentes para desarrollar esa actividad. Sin embargo, las empresas de ingeniería eléctrica, enfocadas al diseño y construcción de infraestructura eléctrica no cuentan con una guía clara y detallada para realizar un análisis de corrientes de corto circuito el cual diferencie aspectos como el tipo de instalación a diseñar y la norma a aplicar. Esto hace que el proceso de certificación de un proyecto eléctrico, pueda tornarse extenso y complejo; pues no siempre se tiene claridad respecto a los pasos que se deben seguir, y de los documentos que se deben anexar junto a cada diseño. Por esta razón es de gran importancia que el ingeniero electricista tenga claridad acerca de las metodologías manejadas en cada una de las normas, las diferencias que estas presentan, la información demandada, y poder así aplicarlas a los diferentes casos que se puedan presentar, teniendo entonces el criterio técnico requerido y facilitando la toma de decisiones y disminuyendo los riesgos eléctricos de las instalaciones y el impacto económico que estas puedan llegar a tener.

El crear un documento que sirva de guía a un profesional en electricidad para un análisis de corrientes de corto circuito requiere de una revisión detallada de la normas que aplican a este caso, además de realizar un estudio comparativo entre los modelos internacionales que guían los procedimientos actualmente empleados para este tipo de análisis y también se requiere de simulaciones y datos experimentales que sustenten la idoneidad de la metodología que se busca plantear en este trabajo.

En la actualidad tenemos dos normas aplicables, las cuales constan de un procedimiento para el cálculo de corrientes de cortocircuito las cuales son: La IEC y la ANSI/IEEE, pero estas son de carácter general, ya que no se realiza en ninguno de los casos una

especificación de los parámetros requeridos de acuerdo a los diferentes tipos de instalaciones eléctricas de uso final definidos por otros reglamentos como el RETIE, además hasta el momento no se tienen una bases claras para el diseñador sobre cuál es el procedimiento más óptimo a aplicar en los diferentes casos teniendo en cuenta que los procedimientos descritos por la norma IEC o la ANSI/IEEE presentan diferencias ocasionando así que los resultados de los estudios de corrientes de cortocircuito a un mismo sistema eléctrico no sean iguales y dejando un vacío para el diseñador al momento de escoger que metodología es más óptima.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Definir los parámetros necesarios para el análisis de corrientes de cortocircuito en los diferentes tipos de instalaciones eléctricas de uso final, según las normas IEC 60909-0 y ANSI/ IEEE 141-4.

1.4.2 Objetivos específicos

- Alcanzar el estado del arte.
- Estudiar y comparar los procedimientos empleados para el cálculo de corrientes de cortocircuito según las normas IEC 60909-0 y ANSI/ IEEE 141-4.
- Clasificar los tipos de instalaciones eléctricas de uso final y análisis de corto circuito aplicable a cada tipo de instalación.
- Definir una metodología clara y precisa para el cálculo de corrientes de cortocircuito.
- Simular los diferentes tipos de instalaciones eléctricas de uso final usando el software Digsilent Powerfactory y Etap, para el análisis de corrientes de cortocircuito según las normas IEC 60909-0 y ANSI/ IEEE 141-4.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

2. CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO

2.1. INTRODUCCIÓN

El cortocircuito se define como la conexión deliberada o accidental a través de una resistencia o impedancia relativamente baja entre dos o más puntos de un circuito los cuales usualmente tienen diferente tensión. [2], [3].

Aun en los sistemas eléctricos mejor diseñados, ocasionalmente se experimentan cortocircuitos, resultando corrientes anormalmente grandes. Los dispositivos de protección de sobre corriente tales como interruptores y fusibles, deben aislar la falla en un lugar dado de forma segura con un mínimo daño a los circuitos y equipos. Otras partes del sistema tales como cables, buses o interruptores, deben ser capaces de soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos resultantes del flujo máximo de la corriente de cortocircuito a través de ellos.

El flujo de corriente durante un cortocircuito en cualquier punto del sistema está limitado por la impedancia de los circuitos y el equipo desde la fuente o fuentes al punto de falla, y no está directamente relacionado con el tamaño de la carga en el sistema. Sin embargo, adiciones al sistema que incrementen su capacidad hacen que sea necesario la instalación o modificación de dispositivos tales como transformadores nuevos o transformadores de mayor capacidad, los cuales no afectan la carga normal en algunos lugares existentes en el sistema, pero pueden aumentar drásticamente las corrientes de cortocircuito en estos lugares. Si un sistema existente se amplía o un nuevo sistema es instalado, las corrientes de cortocircuito disponibles deben ser determinadas para una aplicación correcta de los dispositivos de protección de sobre corriente.

Las corrientes máximas de cortocircuito calculadas casi siempre se requieren. En algunos casos, también se necesitan los valores mínimos para comprobar los requisitos de sensibilidad de los dispositivos de protección sensibles a la corriente.

2.2 TIPOS DE CORTOCIRCUITO

2.2.1 Cortocircuito trifásico simétrico

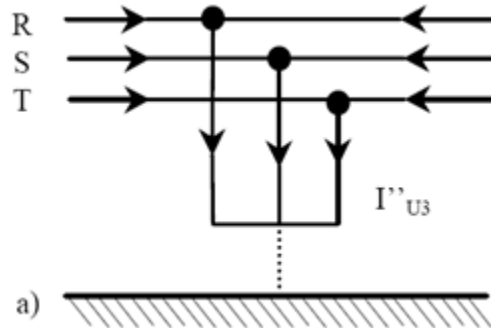


Figura 2-1 Cortocircuito trifásico simétrico

Corresponde a un cortocircuito entre las tres fases de forma simultánea. Los cortocircuitos trifásicos, son los únicos cortocircuitos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases están afectadas por igual. Las Tensiones en el punto de cortocircuito, tanto si el cortocircuito se cierra a través de tierra como si se está aislado de ella. Son nulas. Presentando las intensidades igual modulo pero un argumento desfasado 120° .

El cortocircuito trifásico simétrico es uno de los cortocircuitos más violentos y de cálculo obligatorio. Al ser un sistema equilibrado, para su cálculo solo es necesario utilizar la red de secuencia directa. . [4][5]

2.2.2 Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra

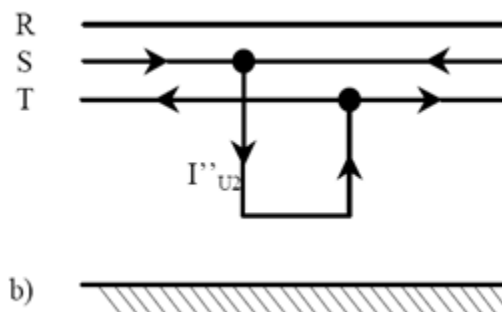


Figura 2-2 Cortocircuito bifásico sin contacto a tierra

Corresponde a un cortocircuito entre dos fases sin hacer contacto con la referencia a tierra. En este tipo de cortocircuito generalmente las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que la del fallo trifásico, anqué si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, las corrientes de

esta falla pueden llegar a presentar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico.

Al presentarse en dos de las tres fases del sistema, este cortocircuito ya no es equilibrado, por esta razón en su cálculo se debe utilizar tanto la red directa como la red e secuencia inversa. [4][5]

2.2.3 Cortocircuito bifásica a Tierra

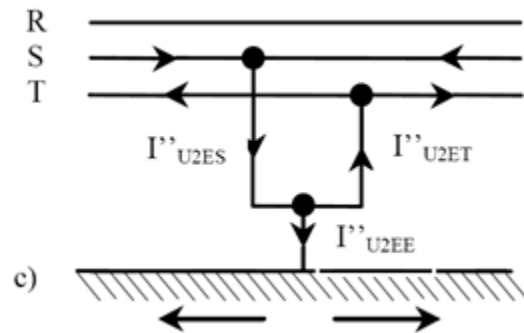


Figura 2-3 Cortocircuito bifásica a Tierra

Corresponde a un cortocircuito entre dos fases y drenado a tierra. Dispone de las mismas características que el cortocircuito bifásico sin contacto a tierra, pero en este caso con pérdidas de energía hacia tierra. Es necesario para su cálculo además de las redes de secuencia directa e inversa, la red de secuencia homopolar debido a la pérdida de energía. [4][5]

2.2.4 Cortocircuito monofásica a Tierra

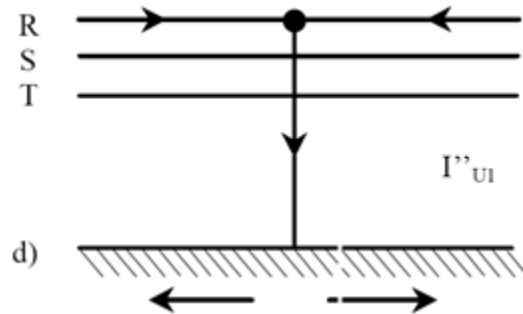


Figura 2-4 Cortocircuito monofásica a Tierra

Corresponde a un cortocircuito entre una fase y la referencia a tierra. Este es el cortocircuito más frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes rígidamente puestas a tierra, o mediante impedancias de bajo valor.

Su cálculo es importante, tanto por lo elevado de sus corrientes como por su conexión a tierra, lo que permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso, o

valorar las interferencias que estas corrientes puedan provocar. Para su cálculo, al ser desequilibrado y con pérdidas de energía, son necesarias las tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar). [4][5]

2.2.5 Cortocircuito con doble contacto a tierra

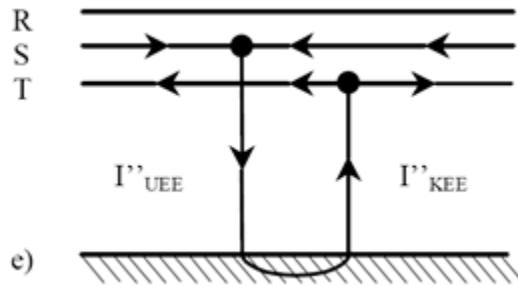


Figura 2-5 Cortocircuito con doble contacto a tierra

En redes con neutro aislado o puestas a tierra con impedancias de gran valor. Puede aparecer el doble contacto tierra.

Este cortocircuito presenta valores de corriente inferiores al resto de los cortocircuitos. Si consideramos que es poco frecuente y la complejidad que representa su cálculo, se comprenderá que es el cortocircuito menos analizado. [4][5]

2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

La definición de las componentes simétricas se basa en la equivalencia entre un sistema trifásico desequilibrado y la suma de tres sistemas trifásicos equilibrados: directo, inverso y homopolar también llamados secuencia positiva, negativa y cero.

Se asume un sistema trifásico desbalanceado (diferente magnitud y desfase diferente a 120°) representado por tres fasores nombrados I_a I_b I_c , se asume que estos fasores se pueden expresar como la suma de las siguientes cantidades:

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2$$

$$I_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2$$

$$I_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2$$

En donde el superíndice “0” denota componente de secuencia cero, el superíndice “1” denota la componente de secuencia positiva, y finalmente, superíndice “2” denota componente de secuencia negativa. es de uso común igualmente denotar la componente positiva con el superíndice “+” y la componente negativa con el superíndice “-”.

Es común agrupar las cantidades del lado derecho de la igualdad (que aún no se han definido) en tres grupos según el superíndice:

Componentes de secuencia cero: $\{I_a^0, I_b^0, I_c^0\}$

Componentes de secuencia positiva: $\{I_a^1, I_b^1, I_c^1\}$

Componentes de secuencia negativa: $\{I_a^2, I_b^2, I_c^2\}$

Las componentes de secuencia cero son tres fasores de igual magnitud e igual fase

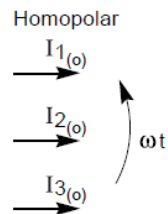


Figura 2-6 Componentes de secuencia cero

Las componentes de secuencia positiva son tres fasores de igual magnitud pero desfasados 120° , siguiendo la secuencia positiva que es comúnmente usada en los cursos de circuitos y electricidad.

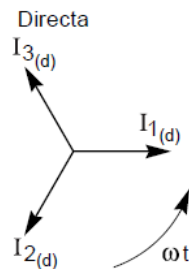


Figura 2-7 Componentes de secuencia positiva

Las componentes de secuencia negativa son tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° , y de secuencia opuesta a las componentes de secuencia positiva.

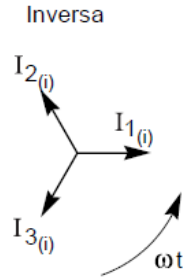


Figura 2-8 Componentes de secuencia negativa

Con el fin de facilitar los cálculos y aprovechar las características de las componentes de secuencia se define el operador α , como un fasor dado por:

$$\alpha = e^{j(2\pi/3)} = e^{j(120^\circ)}$$

Nótese que el operador α presenta la siguiente propiedad:

$$\alpha^2 = e^{j(4\pi/3)} = e^{j(240^\circ)}$$

El operador anterior y su propiedad permiten expresar las distintas componentes de los grupos de secuencia en una función de UNA componente de cada grupo, esto es:

Secuencia positiva: $I_b^1 = \alpha^2 I_a^1$

$$I_c^1 = \alpha I_a^1$$

Secuencia negativa: $I_b^2 = \alpha I_a^2$

$$I_c^2 = \alpha^2 I_a^2$$

Secuencia cero: $I_a^0 = I_b^0 = I_c^0$

Con lo anterior es posible representar los fasores desbalanceados I_a I_b I_c de forma matricial en función del operador α y en función de una componente de cada grupo de secuencia:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

Es posible determinar el valor de las componentes de secuencia conociendo el valor de los fasores desfasados I_a I_b I_c :

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

La transformación de tres fasores desbalanceados (como los que se presentan en situación de fallo) en tres conjuntos de fasores (cero, positiva y negativa) facilita el cálculo de las corrientes de corto circuito pues al menos dos conjuntos de fasores (positiva y negativa) son componentes balanceadas.

La aplicación de la teoría de componentes simétricas a los distintos elementos de una red eléctrica, origina a las denominadas redes de secuencia, que tienen una gran utilidad en el análisis de redes con un desequilibrio puntual, como ocurre en el cálculo de cortocircuito. [5]

2.4 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

2.4.1 Máxima y mínima corriente de cortocircuito

Se define a ambas como el máximo ó el mínimo valor posible que puede alcanzar la corriente de cortocircuito al momento en que se presente una falla para un determinado punto en una instalación.

La corriente de cortocircuito está directamente relacionada con el tamaño y la capacidad de las fuentes de generación y es típicamente independiente de la carga. Los principales factores que determinan la magnitud y duración de un cortocircuito son el tipo de falla, las fuentes, y las impedancias entre las fuentes y el punto de localización de la falla. Las características, localización y tamaños de las fuentes de corrientes de falla interconectadas al sistema durante el tiempo que ocurre un corto circuito, tienen influencia tanto en la magnitud como en la forma de la onda de la corriente de falla. [10]

Los motores de inducción, los motores síncronos y generadores constituyen las principales fuentes de corriente de cortocircuito, pues durante un cortocircuito, los motores síncronos y de inducción actuarán como generadores entregando corriente de cortocircuito con base en la cantidad de energía eléctrica almacenada en ellos; esto indica que existe una relación entre los elementos de naturaleza inductiva presentes en el circuito y la magnitud y comportamiento de la corriente de cortocircuito, este factor determina que al momento de estudiar y analizar el fenómeno de cortocircuito se diferencien entre aquellos que se presentan alejados de las centrales generadoras (normalmente alta tensión) de aquellos que se presentan lejos de las centrales generadoras (normalmente baja tensión).

En sistemas de baja tensión, los valores mínimos de corriente de cortocircuito son calculados en ocasiones para conocer los efectos de arqueo. Estudios analíticos indican que corrientes de cortocircuito con arqueo sostenido, en por unidad de valores de falla franca, pueden ser típicamente tan bajos como: [6]

- a) 0.89 en 480V y 0.12 en 208V para arqueo trifásico
- b) 0.74 en 480V y 0.02 en 208V para arqueo monofásico de línea a línea
- c) 0.38 en 277V y 0.01 en 120V para arqueo monofásico de línea a neutro

2.4.2 Corrientes simétricas y corrientes asimétricas

En una gráfica de amplitud de la corriente de falla en función del tiempo, los términos corrientes simétricas y corrientes asimétricas describen la posición de la onda de la corriente de falla en función de la simetría respecto al eje horizontal. Esta simetría depende del tiempo durante el cual se presenta la falla y de la impedancia (resistencia y reactancia) de la red.

Para entender mejor como la impedancia de un circuito afecta la simetría de la señal de corriente se ilustra con la siguiente explicación:

Una red simplificada se reduce a una fuente de tensión alterna constante, un interruptor, una impedancia Z_{cc} , que representa todas las impedancias aguas arriba del interruptor, y una impedancia Z_s de la carga. En realidad, la impedancia del generador está compuesta de todo lo que hay aguas arriba del cortocircuito, incluidas las redes de las diversas tensiones (alta tensión y baja tensión) y el conjunto de conductores serie, con sus diferentes secciones y longitudes.

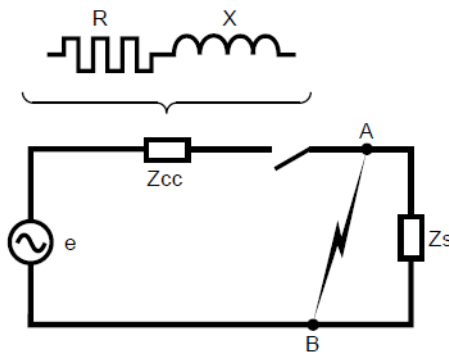


Figura 2-9 Esquema simplificado de una red.

Cuando se produce un defecto de impedancia despreciable entre los puntos de impedancia despreciable entre los puntos A y B, aparece una intensidad de cortocircuito, I_{cc} , muy elevada, limitada únicamente por la impedancia Z_{cc} .

La intensidad I_{cc} se establece siguiendo un régimen transitorio en función de las reactancias X y de las resistencias R que son las componentes de la impedancia Z_{cc} :

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

En una distribución de potencia, la reactancia $X = L\omega$ es generalmente mucho mayor que la resistencia R , y la razón R/X está entre 0,10 y 0,3. Este valor sigue siendo prácticamente igual para valores bajos del $\cos \phi_{cc}$ (factor de potencia durante el cortocircuito), o sea:

$$\cos \phi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Sin embargo, el régimen transitorio de establecimiento de una corriente de cortocircuito depende normalmente de la distancia del punto de defecto a los alternadores. Esta distancia no implica necesariamente una distancia geográfica, sino que se sobre entiende que las impedancias de los alternadores son inferiores a las de las conexiones entre ellos y el punto de defecto.

$$e = E \sin(\omega t + \alpha)$$

Así, la intensidad i es la suma de dos componentes: $i = i_a + i_c$.

La componente i_a es alterna i sinusoidal

$$i_a = I \sin(\omega t + \alpha)$$

Donde I intensidad máxima $= \frac{E}{Z'_{cc}}$

α = al ángulo que caracteriza el desfase en el tiempo entre el instante inicial del defecto y el origen de la onda de tensión.

La componente (i_c) es una componente unidireccional:

$$i_{cc} = -I \sin(\alpha) e^{-\frac{R}{L}t}$$

Su valor inicial depende de α , y su amortiguamiento es tanto más rápido cuanto mayor es la relación R/L .

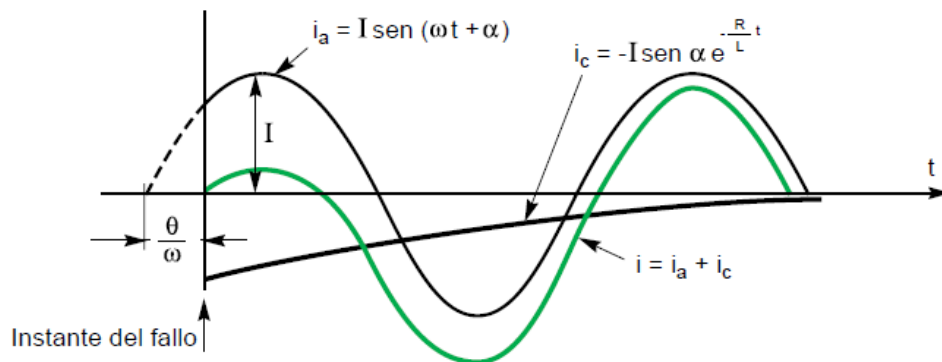


Figura 2-10 Representación gráfica y descomposición de la corriente de un cortocircuito producido en un punto alejado del alternador.

El factor $e^{-\frac{Rt}{L}}$ es tanto mayor cuanto menor es el amortiguamiento de la componente unidireccional, es decir, la razón R/L o R/X.

Las figuras 2.11 y 2.12 presentan los dos casos extremos posibles de establecimiento de una corriente de cortocircuito I_{cc} , que, para facilitar la comprensión, se representan con una tensión alterna monofásica.

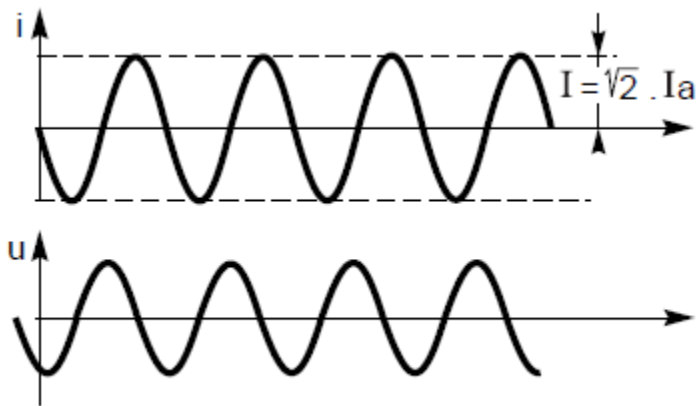


Figura 2-11 Presentación gráfica del caso extremo de una corriente de cortocircuito simétrica.

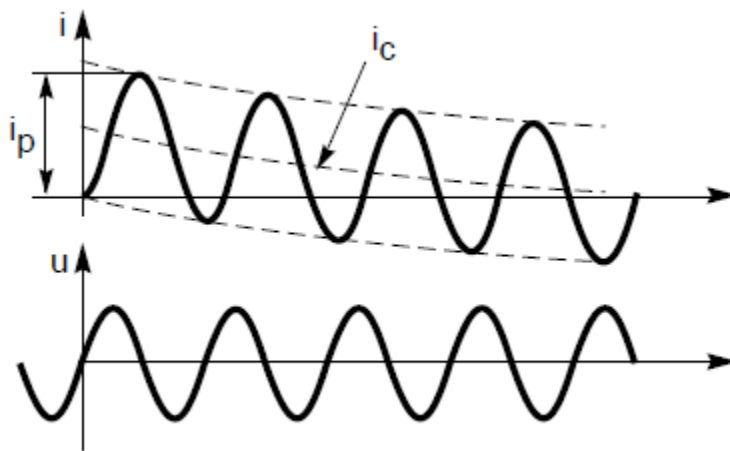


Figura 2-12 Presentación gráfica del caso extremo de una corriente de cortocircuito asimétrica.

Entender la relación entre la simetría de las corrientes y los elementos inductivos presentes en el circuito, permite entender con claridad la metodología empleada por la IEC, la cual diferencia entre aquellos fallos que suceden cerca de las centrales de generación de aquellos que suceden lejos y pues los primero tiene mayor incidencia inductiva (motores, generadores, líneas) y para el segundo caso los factores inductivos son casi despreciables.[5]

3. CAPÍTULO 3 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SEGÚN IEC 60909-0

3.1 LA IEC (COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNATIONAL)

La IEC o CEI por sus siglas en inglés (Comisión Electrotécnica International) es una organización mundial para la normalización de origen europea, que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales. El objetivo de la IEC es promover la cooperación internacional sobre todas las cuestiones relativas a la normalización en el campo eléctrico y electrónico. Para este fin y también para otras actividades, IEC publica Normas Internacionales. Su elaboración se confía a los comités técnicos; cualquier comité nacional de IEC que esté interesado en el tema objeto de la norma puede participar en su elaboración. Organizaciones internacionales gubernamentales y no gubernamentales relacionadas con la IEC también pueden participar en la elaboración. IEC colabora estrechamente con la Organización Internacional de Normalización (ISO), de acuerdo con las condiciones determinadas por acuerdo entre ambas.

3.2 LA NORMA IEC 60909-0

Esta parte de la norma IEC 60909 establece un procedimiento general, práctico y conciso, que conduce a resultados que generalmente son de precisión aceptable. Este método está basado en el teorema de Thevenin que consiste en calcular una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito para, seguidamente, determinar la corriente en el mismo punto. Todas las alimentaciones de la red y las maquinas síncronas y asíncronas se sustituyen por impedancias. Este método definido por la IEC es de gran utilidad, pues puede ser utilizado por ingenieros no especializados que estén familiarizados con el concepto de las componentes simétricas. Este método de cálculo permite hallar las corrientes máximas y mínimas, estas primeras permiten determinar las características que hay que asignar a los materiales eléctricos, las segundas, las mínimas, son necesarias para ajustar el calibre de las protecciones de sobre corriente.

El procedimiento detallado descrito por la norma IEC 60909-0 consiste en los siguientes pasos:

- a) **Paso 1:** Definir el tipo de falla.
- b) **Paso 2:** Cálculo de la tensión equivalente en el punto de falla.
- c) **Paso 3:** Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directas, inversas y homopolares, aguas arriba del punto de falla.
- d) **Paso 4:** Calculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas.
- e) **Paso 5:** A partir del valor de I_{cc} (I''_K). Se calculan otras magnitudes como I_{cc} de cresta, I_{cc} permanente o incluso, I_{cc} permanente máxima.

3.2.1 Definición del tipo de falla

Los cálculos que detallan el procedimiento dado por la norma IEC 60909 tienen en consideración la distancia y ubicación que tiene la falla con respecto a los generadores síncronos y de igual manera el tipo de configuración que guardan las fuentes del cortocircuito con respecto al punto donde se presenta la falla. [3]

3.2.1.1 Distancia de la falla con respecto a los generadores síncronos

Con este método de cálculo se distinguen dos casos:

- a. Aquellos cortocircuitos alejados de los alternadores, que corresponden a redes en las que las corrientes de cortocircuito no tienen componente alterna amortiguada o magnitud de la componente CA de corto circuito (ver figura 3-1). Es generalmente el caso de los circuitos de baja tensión, salvo los que tienen receptores de gran consumo alimentados por centros de transformación propios.

Para los cortocircuitos alejados de la generación se presenta igualdad:

- Por una parte, entre los valores de corriente de corto circuito inicial (I''_K), permanente (I_K) y cortada (I_b) ($I''_K = I_K = I_b$)
- Y por otra parte, entre las impedancias directa (Z_1) e inversa (Z_2) o sea ($Z_1 = Z_2$)

- b. Aquellos cortocircuitos próximos a los alternadores, que corresponden a redes para las que las corrientes de cortocircuito tienen componentes alternas amortiguadas (ver figura 2). Este caso se presenta generalmente en circuitos de alta tensión, pero, también puede presentarse en baja tensión cuando, existen generadores de emergencia que alimentan una o varias cargas prioritarias (hospitales, edificios oficiales o gubernamentales).

A diferencia de los cortocircuitos lejanos al generador, para los cortocircuitos próximos a los alternadores, se produce la desigualdad: $I_K < I_b < I''_K$. Por ende no necesariamente Z_1 es igual a Z_2 .

Nota: hay que destacar que los motores asíncronos pueden también alimentar un cortocircuito, pudiendo alcanzar su aportación en un 30% del valor de la ICC de la red durante los primeros treinta milisegundos: la ecuación ($I''_K = I_K = I_b$) no es, entonces, cierta. [3]

3.2.1.2 Configuración de la falla.

De acuerdo a la configuración que guardan las fuentes con respecto al punto de falla, la IEC 60909 define tres tipos de redes y en base a esta clasificación determinas las diferentes corrientes.

- a. Configuración radial con una fuente
- b. Configuración No mallada con varias fuentes
- c. Configuración con varias fuentes e impedancia común
- d. Configuración mallada.

3.2.2 Cálculo de la tensión equivalente en el punto de falla

Calculo de la tensión equivalente en el punto de la falla, igual a:

$$U_{eq} = C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

Se introduce un factor “C” de la tensión, el cual es necesario para tener en cuenta:

- las variaciones de tensión en el espacio y en el tiempo
- los cambios eventuales en las conexiones de los transformadores
- El componente subtransitorio de los alternadores y de los motores

Según los cálculos a efectuar y las márgenes de tensión consideradas, los valores normativos de este factor de tensión están indicados en la tabla 3-1

Tabla 3-1 FACTOR C DE TENSIÓN.

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de	
	Las corriente de cortocircuito máximas $C_{max}^{1)}$	Las corrientes de cortocircuito mínimas C_{min}
Baja tensión 100 V a 1000V (Tabla 1 de la norma CEI 60038)	1.05 ³⁾ 1.10 ⁴⁾	0.95
Media tensión > 1 KV a 35KV (Tabla 3 de la Norma CEI 60038)	1.10	1.00
Alta tensión²⁾ > 35 KV (Tabla 4 de la Norma CEI 60038)		

1) $C_{max}U_n$ no debería exceder de la tensión más elevada para el material U_m de los sistemas de potencia.
 2) Si no está definida la tensión nominal se debería aplicar: $C_{min}U_n = U_m$ o $C_{min}U_n = 0,9xU_m$
 3) Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de +6%, por ejemplo sistemas renombrados de 380 V a 400 V
 4) Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de +10%.

Fuente: Basado en IEC 60909-0 Edición 2001

Con la fuente equivalente (contando el factor de tensión C) se considera que:

- Se pueden ignorar las cargas estáticas.
- Los cambiadores de derivación de los transformadores (taps) se encuentran en posición nominal.
- La excitación de los generadores es un dato que se puede ignorar.
- Todos los alimentadores de la red, maquinas síncronas y asíncronas se representan por sus impedancias internas.
- Todas las capacitancias de la líneas y cargas estáticas se desprecian, excepto para aquellas que intervienen en el sistema de secuencia cero.

Se muestra un ejemplo de una fuente equivalente en el punto de falla, para un sistema eléctrico alimentado desde la red de suministro a través de un solo transformador. [3]

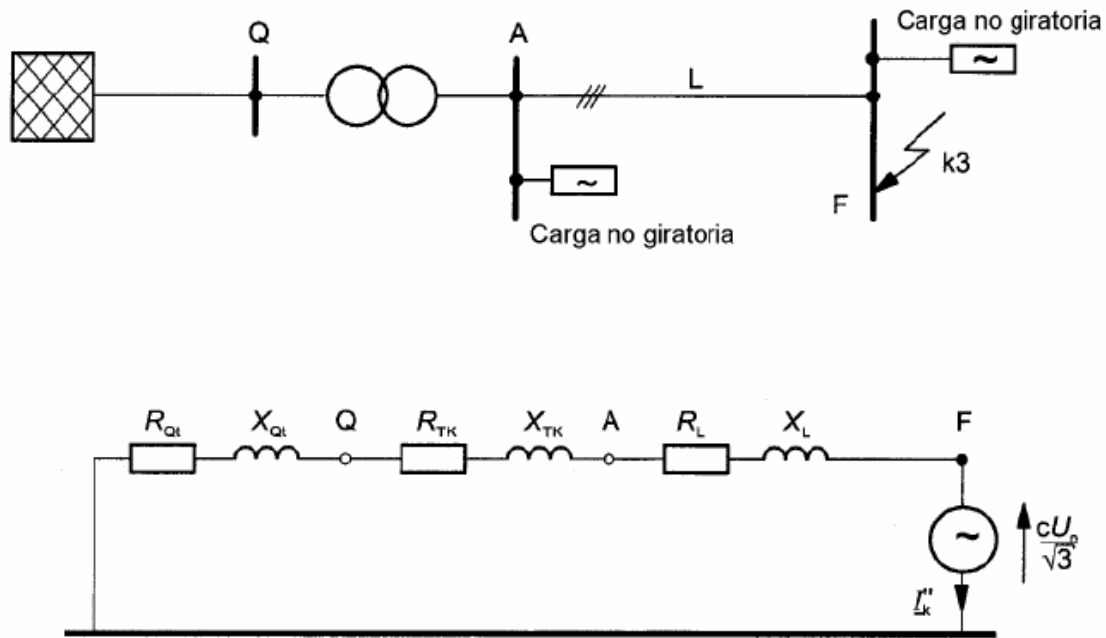


Figura 3-3 Ilustración del cálculo de corriente simétrica inicial de corto circuito I''_k de acuerdo con el procedimiento de tensión de la fuente (IEC 60909-0 Edición 2001)

Se observa que:

- Solo existe una fuente de tensión
- Todas las otras tensiones del sistema se suponen cero.
- El alimentador se representa por su impedancia interna Z_Q

Las admitancias en derivación (esto es, capacitancias de línea y cargas pasivas) no se consideran en los cálculos e corriente de corto circuito.

3.2.3 Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directas, inversas y homopolares, aguas arriba del punto de falla.

Para esto se deben conocer todos los valores de reactancias y resistencias, y tener definida la topología de la red. Se deben calcular para las tres redes de secuencia, a saber: secuencia positiva, negativa y cero.

En redes de alimentación, transformadores, líneas aéreas, cable, reactancias y equipos similares, las impedancias de cortocircuito de secuencia directa e inversa son iguales: $Z_1 = Z_2$. La impedancia de cortocircuito homopolar $Z_0 = U_0 / I_0$ se determina suponiendo una tensión alterna entre los tres conductores en paralelo y el circuito de retorno (por ejemplo la tierra, el sistema de puesta a tierra, el conductor neutro, el hilo de tierra, la pantalla de los cables y la armadura de lo mismo). En este caso el conjunto de las tres corrientes homopolares circula por el circuito de retorno. Las impedancias de los alternadores (G), de los transformadores de red (T) y de los grupos de generación (S), deberán ser multiplicadas por los factores de corrección de impedancia K_G , K_{TY} , K o K_{SO} cuando se calculen las

corrientes de cortocircuito con la fuente de tensión equivalente en el punto de defecto, de acuerdo con esta norma. [3]

Nota: En el Informe Técnico IEC 60909-4 se dan ejemplos para la introducción de los factores de corrección de impedancia.

3.2.4 Cálculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas.

Tabla 3-2 VALOR DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN FUNCIÓN DE LAS IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR DE UNA RED.

Tipo de corto circuito	I''_K caso general	Defecto alejado de los generadores
Trifásico (Z_i cualquiera)	$C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_d }$	$C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_d }$
	En los dos casos, la corriente de cortocircuito solo depende de Z_d . Generalmente Z_d se reemplaza por Z_k impedancia de cortocircuito en el punto de defecto con $Z_k = \sqrt{RK^2 + XK^2}$ donde RK es la suma de las resistencias de una fase conectadas en serie, XK es la suma de las reactancias de una fase conectadas en serie.	
Bifásico aislado ($Z_t = \infty$)	$C \cdot \frac{U_n}{ Z_d + Z_i }$	$C \cdot \frac{U_n}{2 * Z_d }$
Monofásico	$C \cdot \frac{U_n * \sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_0 }$	$C \cdot \frac{U_n * \sqrt{3}}{ 2 * Z_d + Z_0 }$
Bifásico a tierra (Z_{CC} entre fases igual a cero)	$C \cdot \frac{U_n * Z_i * \sqrt{3}}{ Z_d Z_i + Z_i Z_0 + Z_d Z_0 }$	$C \cdot \frac{U_n * \sqrt{3}}{ Z_d + 2 * Z_0 }$
Datos de la tabla		
<ul style="list-style-type: none"> • Impedancias inversa directa y homopolar Z_d, Z_i y Z_0 • Impedancia de tierra Z_t • Impedancia de cortocircuito Z_{CC} 		

Fuente: Basado en IEC 60909-0 Edición 2001

3.2.4.1 Cálculo de la corriente máxima o mínima

Con este método se distinguen criterios que definen el cálculo de la corriente máxima o mínima de un circuito, ambas útiles en el diseño de instalaciones eléctricas:

- a. Cálculo de corriente de cortocircuito máxima
 - El factor de tensión “c” a aplicar corresponde al cálculo de cortocircuito máximo,

- Hipótesis de cálculo por exceso (Revisar)
 - las resistencias RL de las líneas (líneas aéreas, cables, conductores de fase y neutro) hay que considerarlas a una temperatura de 20 °C.
- b. Calculo de corrientes de cortocircuito mínimas
- Aplicar el valor del factor de tensión c correspondiente a la tensión mínima autorizada para la red,
 - Elegir la configuración de la red, y en ciertos casos, la alimentación mínima para generadores y líneas de alimentación de la red, de tal manera que nos conduzcan al valor mínimo de la corriente de cortocircuito en el punto del defecto,
 - Tener en cuenta la impedancia de los juegos de barras, la de los transformadores de corriente, etc.,
 - Ignorar los motores
 - Considerar las resistencias RL a la temperatura más elevada previsible:

$$R_L = \left[1 + \frac{0,004}{^{\circ}C} * (\theta_e - 20^{\circ}C) \right] * R_{L20}$$

Donde R_{L20} es la resistencia a la temperatura de 20 °C y θ_e la temperatura (en °C) admisible para el conductor al acabar el cortocircuito.

El factor 0,004 / °C se aplica al cobre, al aluminio y a las aleaciones de aluminio.

En la práctica, según el tipo de defecto, las formulas a emplear para el cálculo de la corriente de cortocircuito están indicadas en la tabla de la figura 3-2.

3.2.5 Cálculos a partir del valor de (I_k'').

Se calculan otras magnitudes como de corrientes necesarias para el análisis de cortocircuito y el diseño de una instalación eléctrica:

- a) Valor de la corriente de cresta I_p
- b) Valor de la corriente de cortocircuito cortada I_b
- c) Valor de la corriente de cortocircuito permanente I_K

3.2.5.1 Valor de cresta I_p de la corriente de corto circuito

El valor de cresta I_p de la corriente de cortocircuito, en las redes no malladas, puede calcularse, cualquiera que sea la naturaleza del defecto, a partir de la fórmula:

$$I_p = K * \sqrt{2} I_K''$$

I_K'' = corriente de cortocircuito inicial, K = factor, función de la relación R/X del circuito, que se determina sobre la curva de la figura 3-4, o también puede calcularse por la fórmula aproximada:

$$K = 1,02 + 0,98 * e^{-\frac{R}{X}}$$

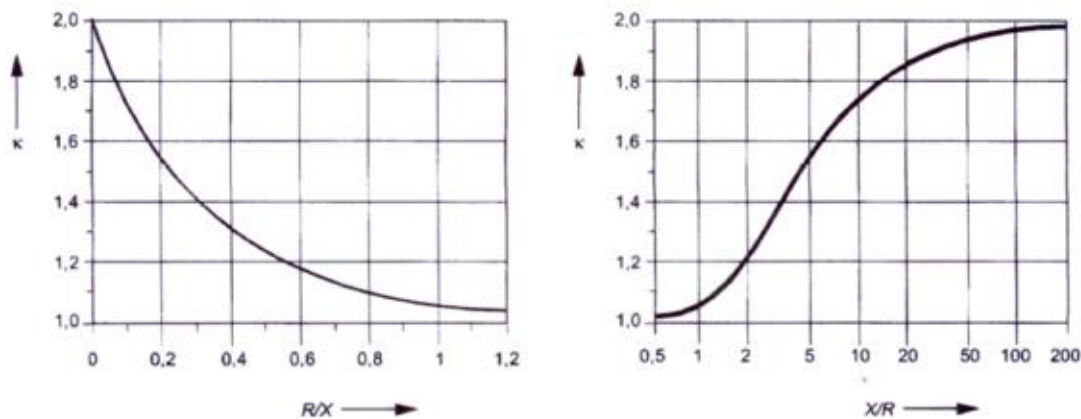


Figura 3-4 Factor K para circuitos en serie como función de la relación R/X o X/R (IEC 60909-0 Edición 2001)

3.2.5.2 Corriente de cortocircuito cortada I_b

El cálculo de la corriente de cortocircuito cortada I_b sólo es necesario en el caso de un defecto cercano a los alternadores y cuando la protección queda asegurada por interruptores automáticos retardados.

Recordamos que esta corriente sirve para determinar el poder de corte de los interruptores automáticos.

Esta corriente puede calcularse, con una buena aproximación, con la ayuda de la siguiente fórmula:

$$I_b = \mu * I_K''$$

μ = factor función del tiempo de retardo mínimo del interruptor t_{\min} y de la razón I_K''/I_K que relaciona la influencia de las reactancias subtransitoria y transitoria con:

I_r = corriente asignada del alternador.

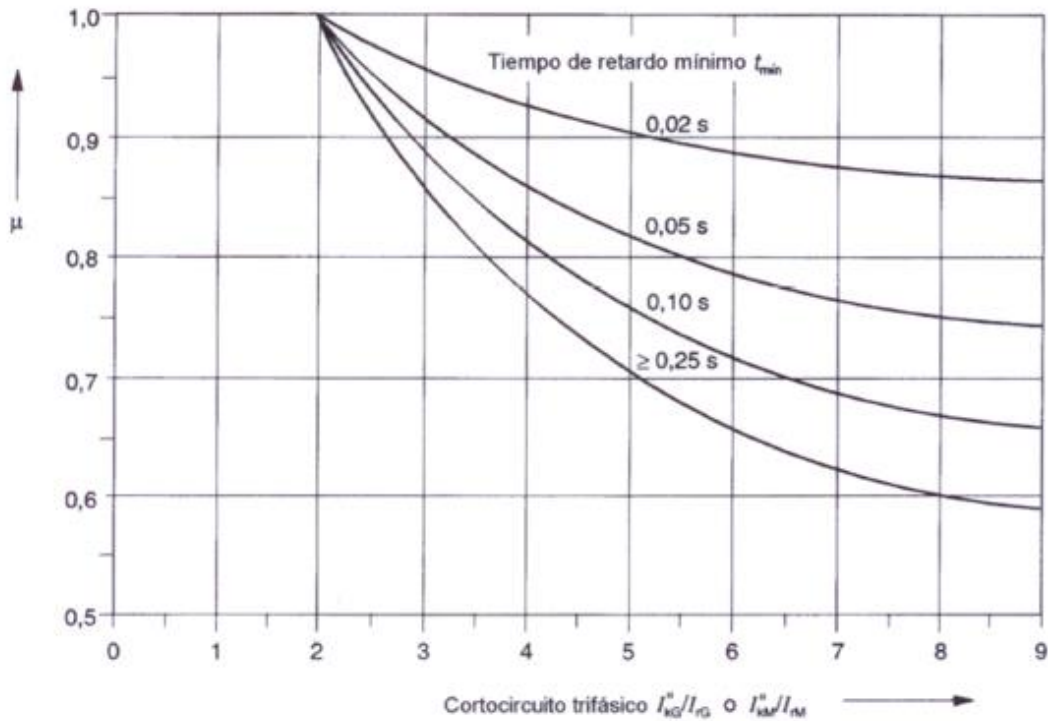


Figura 3-5 Factor μ para el cálculo de la corriente de cortocircuito de corte I_b (IEC 60909-0 Edición 2001)

3.2.5.3 Corriente de cortocircuito I_K permanente

Como la amplitud de la corriente de cortocircuito permanente I_K , depende del estado de saturación del circuito magnético de los alternadores, su cálculo es menos preciso que el de la corriente simétrica inicial I_K'' .

Los métodos de cálculo propuestos podemos considerarlos como encaminados a obtener una estimación suficientemente precisa de los valores superior e inferior para el caso en que el cortocircuito es alimentado por un alternador o por una máquina síncrona. Así:

La corriente máxima de cortocircuito permanente máxima, bajo la máxima excitación del generador síncrono, nos viene dada por:

$$I_{K\text{máx}} = \lambda_{\text{máx}} \cdot I_r$$

La corriente de cortocircuito mínima permanente se obtiene para una excitación constante (mínima) en vacío de la máquina síncrona. Y viene dada por: $I_{K\text{mín}} = \lambda_{\text{mín}} \cdot I_r$ donde I_r = valor asignado de corriente en los bornes del alternador, λ = factor dependiente de la inductancia de saturación $X_d \text{ sat}$.

Los valores de $\lambda_{\text{máx}}$ y $\lambda_{\text{mín}}$ se obtienen mediante la figura 3.6 para los turboalternadores y mediante la figura 3-7 para las máquinas de polos salientes. [3]

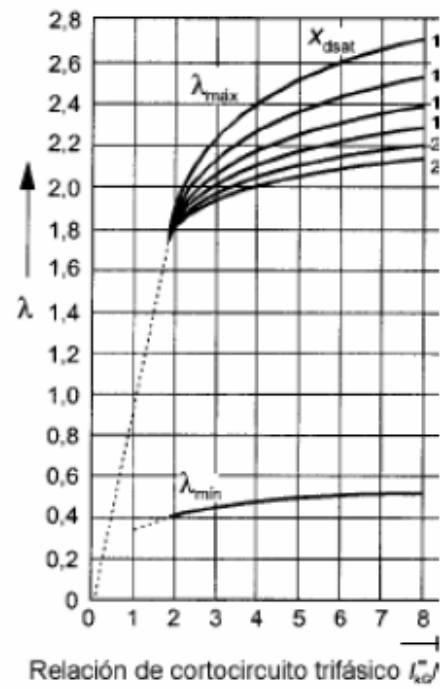
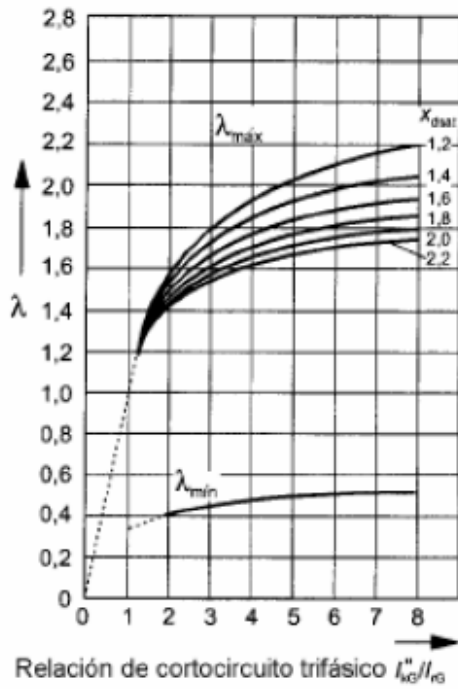


Figura 3-6 Factores $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$ para turbogeneradores (IEC 60909-0 Edici3n 2001)

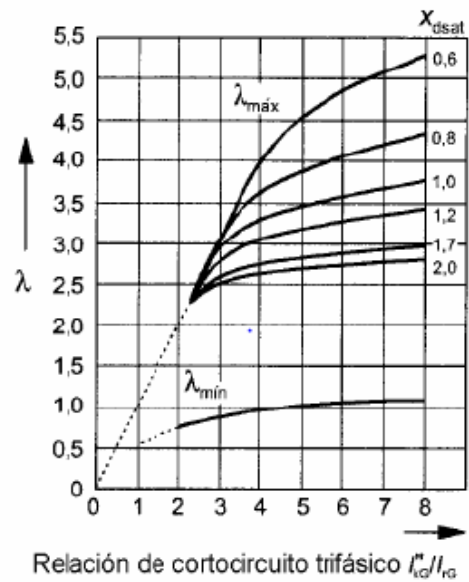
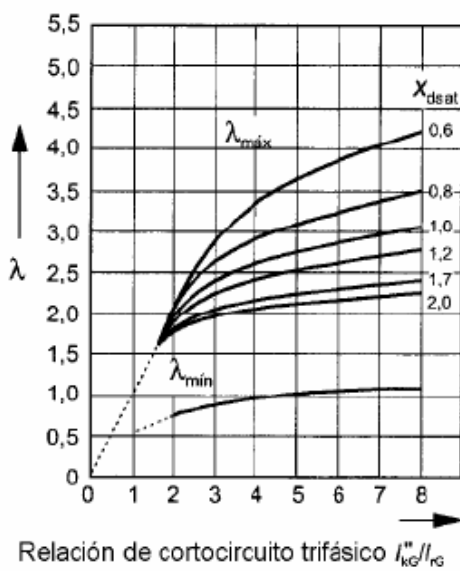


Figura 3-7 Factores $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{i}n}$ para máquinas de polos salientes (IEC 60909-0 Edici3n 2001)

Procedimiento de cálculo de corto circuito en instalación de uso final aplicando IEC 60909

a) Paso 1. Definir el tipo de falla

Una instalación de uso final corresponde a instalaciones que están dentro de la clasificación de instalaciones que presentan fallas lejanas a los generadores, por lo tanto:

- Por una parte, entre los valores de corriente de corto circuito inicial (I''_K), permanente (I_K) y cortada (I_b) ($I''_K = I_K = I_b$)
- Y por otra parte, entre las impedancias directa ($Z1$) e inversa ($Z2$) o sea ($Z1=Z2$)

En cuanto a la configuración que guardan las fuentes con respecto al punto de falla, según la IEC 60909, una instalación de uso final se asemeja a la de configuración radial con una fuente, el cual corresponde al caso ms sencillo de calcular en la norma.

a) Paso 2: Cálculo de la tensión equivalente en el punto de falla.

Para el cálculo de la tensión equivalente en instalaciones eléctricas de uso final la IEC 60909 define el factor C que se muestra en la tabla 3-3

Tabla 3-3 FACTOR DE TENSIÓN C PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MÁXIMAS Y MÍNIMAS

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de	
	Las corriente de cortocircuito máximas $C_{max}^{(1)}$	Las corrientes de cortocircuito mínimas C_{min}
Baja tensión 100 V a 1000V (Tabla 1 de la norma CEI 60038)	1.05 ³⁾ 1.10 ⁴⁾	0.95

Fuente: Basado en IEC 60909-0 Edición 2001

Para el cálculo de la tensión equivalente el procedimiento dado por la norma IEC 60909 realiza las siguientes suposiciones para simplificar el cálculo.

- Se pueden ignorar las cargas estáticas.
- Los cambiadores de derivación de los transformadores (taps) se encuentran en posición nominal.
- La excitación de los generadores es un dato que se puede ignorar.
- Todos los alimentadores de la red, maquinas síncronas y asíncronas se representan por sus impedancias internas.
- Todas las capacitancias de la líneas y cargas estáticas se desprecian, excepto para aquellas que intervienen en el sistema de secuencia cero.

- b) **Paso 3:** Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directas, inversas y homopolares, aguas arriba del punto de falla.

En redes de alimentación, transformadores, líneas aéreas, cable, reactancias y equipos similares, las impedancias de cortocircuito de secuencia directa e inversa son iguales: $Z_1 = Z_2$. La impedancia de cortocircuito homopolar $Z_0 = U_0 / I_0$ se determina suponiendo una tensión alterna entre los tres conductores en paralelo y el circuito de retorno (por ejemplo la tierra, el sistema de puesta a tierra, el conductor neutro, el hilo de tierra, la pantalla de los cable y la armadura de lo mismo).

- c) **Paso 4:** Cálculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas.
- d) **Paso 5:** A partir del valor de I_{cc} (I_K''). Se calculan otras magnitudes como I_{cc} de cresta, I_{cc} permanente o incluso, I_{cc} permanente máxima.

4. CAPÍTULO 4 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SEGÚN ANSI/IEEE 141-4

La norma ANSI/IEEE 141 en el capítulo número 4 propone un método para el cálculo de corrientes de cortocircuito, para realizar los cálculos necesarios y obtener un resultado deseado se considera de gran importancia establecer las impedancias de todos los elementos que conforman el sistema eléctrico a analizar y realizar la conversión de las impedancias para que estas sean consistentes entre si y poder realizar combinaciones en serie y paralelo de los elementos del sistema.

Existen dos formas de expresar las impedancias de un sistema para que estas sean consistentes las cuales son ohms y por unidad. Para el cálculo de corrientes de cortocircuito se realiza la conversión en por unidad de las impedancias del sistema ya que esta forma es mucho más conveniente que la forma óhmica cuando un sistema tiene diferentes niveles de tensión. [6]

4.1 SISTEMAS EN POR UNIDAD

En un sistema en por unidad, existen cuatro cantidades base:

- La Potencia aparente Base (Volts-amperes).
- La tensión base.
- La corriente base.
- La impedancia base.

La relación de base, por unidad y cantidad real se expresa de la siguiente manera:

$$Cantidad\ en\ por\ unidad\ (voltaje,\ corriente,\ etc.) = \frac{Cantidad\ real}{Cantidad\ base}$$

Se selecciona un valor conveniente para la potencia aparente base en volts-amperes, y una tensión base. El valor de la tensión base juega un papel importante ya que al expresar las impedancias en por unidad partiendo de un valor de tensión base estas pueden ser combinadas directamente, sin tener en cuenta los diferentes niveles de tensión del sistema, ya que las tensiones base en otros niveles diferentes al escogido deben ser establecidos relacionando cada nivel de tensión de acuerdo a la relación de vueltas de los transformadores (relación de transformación). La corriente base y la impedancia base en cada nivel son obtenidas por relaciones normales.

Las siguientes formulas aplican a sistemas trifásicos, donde la tensión base es la tensión de línea a línea en volts o kilovolts y la potencia aparente base es la potencia aparente trifásica en kilovolts- amperes o megavolts- amperes:

$$\text{Corriente base (amperes)} = \frac{KVA_{base}(1000)}{\sqrt{3}(V_{base})} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3}(KV_{base})}$$

$$\text{Corriente base (amperes)} = \frac{MVA_{base}10^6}{\sqrt{3}(V_{base})} = \frac{MVA_{base}(1000)}{\sqrt{3}(KV_{base})}$$

$$\text{Impedancia base (ohms)} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3}(I_{base})} = \frac{(V_{base})^2}{KV_{base}(1000)}$$

$$\text{Impedancia base (ohms)} = \frac{(KV_{base})^2(1000)}{KVA_{base}} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

Las impedancias de elementos individuales del sistema son generalmente obtenidas en formas que requieren conversión a las bases relacionadas para poder hacer los cálculos en por unidad. Las impedancias de los cables son generalmente expresadas en ohms. Convirtiendo a por unidad usando las relaciones adecuadas conduce a las siguientes formulas simplificadas, donde la impedancia por unidad es Z_{pu} :

$$Z_{pu} = \frac{\text{impedancia real en ohms (MVA}_{base})}{(KV_{base})^2}$$

$$Z_{pu} = \frac{\text{impedancia real en ohms (KVA}_{base})}{(KV_{base})^2(1000)}$$

Las impedancias de los transformadores se encuentran en por ciento del transformador con enfriamiento propio relacionado en Kilovolts-amperes, donde la impedancia por unidad es Z_{pu} :

$$Z_{pu} = \frac{\text{impedancia en porciento (KVA}_{base})}{\text{relación KVA (100)}}$$

$$Z_{pu} = \frac{\text{impedancia en porciento (10) (MVA}_{base})}{\text{relación KVA}}$$

La reactancia de los motores puede ser obtenida en tablas, proporcionando las reactancias en por unidad de elementos relacionados en Kilovolts-ampere, donde la reactancia en por unidad es X_{pu} :

$$X_{pu} = \frac{\text{reactancia en por unidad (KVA}_{base})}{\text{relación KVA}}$$

4.2 PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

El procedimiento detallado para el cálculo de corrientes de cortocircuito según la norma ANSI/IEEE 141-4 consiste en los siguientes pasos:

- a) Paso 1: Preparar los diagramas del sistema.
- b) Paso 2: Reunir y Convertir los datos de Impedancia.
- c) Paso 3: Combinar Impedancias.
- d) Paso 4: Calcular la corriente de Cortocircuito.

4.2.1 Paso 1: Preparar los diagramas del sistema

Se debe implementar un diagrama unifilar del sistema eléctrico a analizar con el fin de mostrar todas las fuentes de corriente de cortocircuito y todos los elementos significativos del sistema.

En el diagrama unifilar se puede incluir la información de impedancias después de su recolección y conversión. Si el circuito inicial es bastante complejo se procede a realizar las simplificaciones que sean necesarias para obtener un diagrama mucho más sencillo y fácil de trabajar.

El diagrama de impedancias debe mostrar tanto reactancias como resistencias y es necesaria realizar cálculos vectoriales. Para el cálculo de la relación X/R de un sistema se debe preparar un diagrama mostrando únicamente las resistencias de todos los elementos del sistema. [6]

4.2.2 Paso 2: Reunir y Convertir los datos de Impedancia

Los datos de impedancia, incluyendo reactancia y resistencia deben ser reunidos para todos los elementos importantes del sistema y convertidos a por unidad en las bases seleccionadas para el estudio ver anexo 4^a para valores típicos.

Teniendo en cuenta que la resistencia varía con la temperatura, deben ser tomadas algunas consideraciones para la elección de los valores de resistencia para propósitos del estudio.

Para los cálculos de las corrientes máximas de cortocircuito con el fin de seleccionar los equipos del sistema eléctrico, es recomendable asumir el sistema completamente cargado y

los valores de resistencia de carga nominal o “caliente” son los usados y aceptados para estos cálculos, los valores presentados en el anexo 4^a relejan esta aceptación; Por ejemplo, las relaciones X/R de la maquina son a carga nominal, resistencia de líneas aéreas son a 50°C y resistencias de cables son a 75°C y 90°C.

Estos valores de resistencia “caliente” también son aceptables como datos de impedancia para flujos de carga y cálculos similares donde se deseen analizar caídas de tensión y pérdidas máximas. Este uso múltiple proporciona una simplificación de la preparación de datos.

Existe una preocupación de que la operación del sistema a una carga menor que la carga total pudieran reducir las temperaturas de los equipos y componentes, pero según la norma ANSI/IEEE 141-4 al bajar las resistencias e incrementamos las corrientes máximas de cortocircuito calculadas usando estas impedancias. Esto no pasa en la mayoría de los casos para sistemas industriales, porque la reducción de motores conectados, la reducción de carga y por tanto en la contribución de motores para la corriente de cortocircuito calculada, más que compensar el posible incremento a causa de la reducción de la resistencia se incrementa la relación X/R .

Además para sistemas industriales donde se esperan valores relativamente altos de corrientes de cortocircuito, la reactancia en el punto de cortocircuito es generalmente mucho más grande que la resistencia y debido a la cuadratura de la relación de X y R , una posible reducción en valores de resistencia “caliente” usualmente no hacen una diferencia significativa en la impedancia del punto de falla.

Debe examinarse el efecto de resistencia reducida a temperatura reducida, en casos particulares, no incluidos en los procedimientos generales en el capítulo 4 de la norma ANSI/IEEE 141. Por ejemplo, el cálculo de la corriente de cortocircuito de un generador individual justo al ser energizado, antes de que tome carga, se debe usar la resistencia a temperatura ambiente y las relaciones X/R para obtener un resultado adecuado.

Para los edificios de oficinas y para otras instalaciones con cargas principalmente no motoras, la carga total debe ser aplicada sin retraso al arranque y los cálculos deben considerar temperatura de pre-arranque de los componentes y sus resistencias. Para un cortocircuito en baja tensión al final de un circuito alimentador desde una subestación para una carga no motora, donde la resistencia del circuito alimentador es significativa para determinar la magnitud de corriente de cortocircuito, puede ser apropiado suponer ninguna carga con temperatura y resistencia del conductor alimentador para calcular la corriente máxima. [6]

4.2.3 Paso 3: Combinar Impedancias

El tercer pasó es combinar reactancias, vectores de impedancia y resistencias para aplicarse al punto de falla como una sola impedancia equivalente, reactancia o resistencia. La impedancia equivalente de impedancias separadas en serie es la suma de las impedancias separadas. La impedancia equivalente de impedancias separadas en paralelo es el recíproco

de la suma de los recíprocos de las impedancias separadas. Tres impedancias que forman una configuración estrella o delta pueden ser convertidas por las formulas siguientes para una nueva reducción.

a) Estrella a delta

$$A = \frac{b * c}{a} + b + c$$

$$B = \frac{a * c}{b} + a + c$$

$$C = \frac{a * b}{c} + a + b$$

b) Delta a estrella

$$a = \frac{B * C}{A + B + C}$$

$$b = \frac{A * C}{A + B + C}$$

$$c = \frac{A * B}{A + B + C}$$

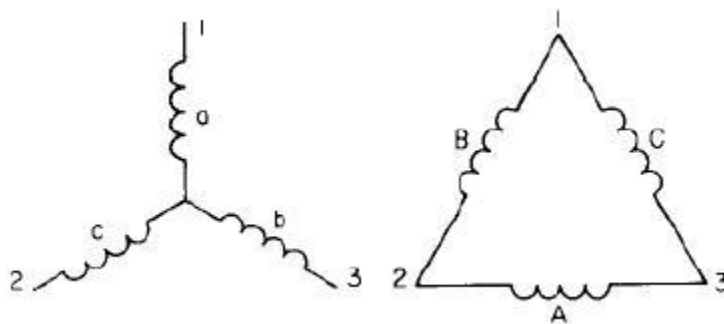


Figura 4-1 Configuración de impedancias de estrella a delta

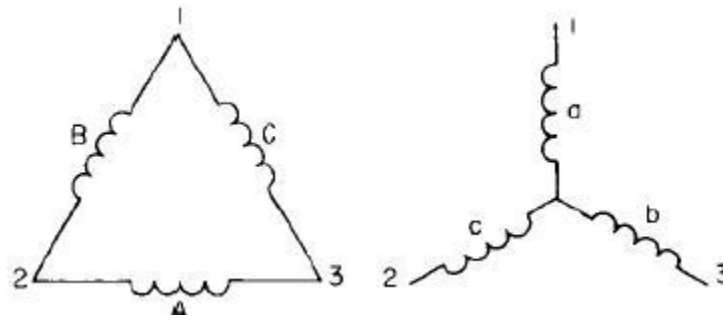


Figura 4-2 Configuración de impedancias de delta a estrella.

4.2.4 Paso 4: Calcular la corriente de Cortocircuito.

Los cálculos detallados son influenciados por la tensión nominal del sistema o tensiones y resultados deseados.

Debe notarse que las tensiones nominales del sistema de acuerdo con la ANSI C84.-1989 son las siguientes:

- a) Baja tensión – menor que 1000V
- b) Media tensión – igual o mayor que 1000 V y menos que 100 000 V
- c) Alta tensión – igual o mayor que 100 000 V e igual o menor que 230 000 V

Las normas IEEE de interruptores de alta tensión, IEEE Std. C37.010-1979 e IEEE Std. C37.5-1979, definen un interruptor de alta tensión como aquellos de capacidad nominal arriba de 1000 V, Por lo tanto estas normas cubren los cálculos de corriente de cortocircuito para aplicaciones de interruptores en ambos sistemas de media y alta tensión. Los resultados de esos cálculos también son usados para aplicaciones de fusibles de media y alta tensión.

Se examinan las tres redes básicas de impedancias seleccionadas, usadas para los resultados más comúnmente empelados:

- a) Esfuerzos del primer ciclo para fusibles e interruptores (1ª RED)
- b) Esfuerzos (interruptivos) de apertura de contactos para interruptores de media y alta tensión.
- c) Corrientes de cortocircuito para tiempos de operación de relevadores con retardo de tiempo.

Las tres redes tienen los mismos elementos básicos excepto para las impedancias de máquinas rotativas. Esas dependen del propósito del estudio. Donde las aplicaciones de interruptores son el propósito del cálculo, las diferentes impedancias se basan en guías de aplicación normativas. [6]

4.2.4.1 Esfuerzos del primer ciclo para fusibles e interruptores (1ª RED)

Para cálculos de esfuerzos de cortocircuito a ser comparados con las capacidades nominales interruptivas de fusibles de baja y media tensión o solamente de interruptores de baja tensión (según ANSI C97.1-1972, IEEE Std. C37.13-1981, IEEE Std. C37.41-1981, NEMA AB 1-1975 y NEMA SG-1981), Se usan las impedancias subtransitorias sin modificar o modificadas para representar todas las maquinas rotativas en la red equivalente.

Esfuerzos en baja tensión. Las normas para equipos interruptivos permiten una reactancia subtransitoria modificada para un grupo motores de inducción o síncronos de baja tensión alimentados desde una subestación de baja tensión. Si el total de HP nominales a 480 o 600 V es aproximadamente igual (o menor) a la capacidad nominal del transformados auto enfriado en KVA, una reactancia de 0.25 por unidad basada en la capacidad del transformador auto enfriado puede ser usada como una sola impedancia para representar al grupo de motores.

Los esfuerzos de cortocircuito en media y alta tensión que son calculados con estas impedancias son usados en aplicaciones de fusibles en media y alta tensión, también son usados cuando se encuentran sistemas disponibles de esfuerzos de cortocircuito para usar como factores en subsecuentes cálculos en baja tensión.

Esfuerzos en media y alta tensión. Para los cálculos de esfuerzos de cortocircuito a ser comparados solamente con la capacidad de cierre y retención de interruptores de alta tensión de acuerdo con IEEE Std. C37.010-1979 (con capacidad nominal posterior a 1964) o la capacidad momentánea de acuerdo con la norma retirada IEEE Std. C37.5-1979 (con capacidad nominal previa a 1964), los factores multiplicativos que se muestran en la columna del primer ciclo de la tabla 4.2-1, son aplicados para reactancias de máquinas rotativas (o impedancias). Para motores, es aproximadamente el decaimiento de CA durante el primer ciclo de la contribución del motor a la corriente de cortocircuito.

La descripción anterior indica que los diferentes tratamientos de motores de inducción podrán hacer antieconómicamente necesarios dos cálculos del primer ciclo para la comprensión de estudios de cortocircuito en sistemas industriales cubriendo ambas situaciones bajas y altas (incluyendo medias) tensiones, si se siguen procedimientos de normas sin interpretación. El procedimiento para la aplicación de interruptores de alta tensión (incluyendo media) descrito en IEEE Std. C37.010-1979 e IEEE Std. C37.5-1979 define tres grandes grupos de motores de inducción, recomienda omitir el grupo de motores menores de 50 HP y aplicar factores multiplicativos de 1.2 o 1.0 a las impedancias subtransitorias de motores en el grupo de grandes motores.

La guía de aplicación de interruptores para baja tensión IEEE Std. C37.13 -1981, recomienda impedancias subtransitorias (típicamente 0.16 o 0.20 en por unidad) para todos los motores de baja tensión conectados al bus cortocircuitado de la subestación en 4 veces su corriente nominal (el equivalente a la impedancia de 0.25 en por unidad). [6]

La contribución de cortocircuito estimada en *4 veces la corriente nominal*, es determinada aproximadamente en la guía de aplicación de interruptores de baja tensión IEEE Std. C37.13-1981, suponiendo un grupo típico conectado conteniendo el 75% de motores de inducción en 3.6 veces la corriente nominal y el 25% motores síncronos en 4.8 veces la corriente nominal. Se pueden hacer suposiciones para otros grupos motores; por ejemplo, en baja tensión muchos grupos ahora tienen grandes motores de inducción en lugar de motores síncronos, pero esos grandes motores también tienen grandes contribuciones de corriente de cortocircuito y de mayor duración. De acuerdo con la aproximación de 4 veces la corriente nominal, continua siendo aceptada en la práctica cuando la carga total es de motores de inducción de diferentes tamaños. [6]

Tabla 4-1 MULTIPLICADORES DE REACTANCIA (O IMPEDANCIA) PARA MAQUINAS ROTATIVAS

Tipo de máquina rotativa	Red del primer ciclo (1ª red)	Red de interrupción (2ª red)
Todos los turbogeneradores; todos los generadores hidroeléctricos con devanados amortiguadores todos los condensadores	1.0 Xd''	1.0 Xd''
Generadores hidroeléctricos sin devanados amortiguados	0.75 Xd''	0.75 Xd''
Todos los motores síncronos	1.0 Xd''	1.0 Xd''
Motores de inducción		
Arriba de 1000 HP a 1800 rpm o menores	1.0 Xd''	1.5 Xd''
Arriba de 250 HP a 3600 rpm o menores	1.0 Xd''	1.5 Xd''
Todos los demás, 50 HP y mayores	1.2 Xd''	3.0 Xd''
Todos los menores de 50 HP	ninguno	ninguno

Fuente: Basado en IEEE Std.C37.010-1979 e IEEE Std.C37.5-1979

Combinación de redes del primer ciclo. Para simplificar amplios cálculos en sistemas industriales, se recomienda una sola red de primer ciclo para reemplazar las dos diferentes redes descritas. Basado en la siguiente interpretación de IEEE Std.C37.010-1979, IEEE Std.C37.5-1979 e IEEE Std.C37.13-1990. Ya que la magnitud inicial rms simétrica de la contribución de corriente al punto de cortocircuito puede ser de 6 veces la capacidad nominal de un motor típico de inducción, usando un estimado de primer ciclo de *4.8 veces la corriente nominal* para grandes motores de inducción de baja tensión (Descrito como *todos los demás, 50 HP y mayores* en la tabla 4-1) es efectivamente la misma que multiplicar la impedancia subtransitoria por aproximadamente 1.2 para este grupo de motores, hay correspondencias razonables para procedimientos de baja y alta tensión. Para pequeños motores de inducción (Todos los menores de *50 HP* en la tabla 4-1) una estimación conservadora de primer ciclo es 3.6 veces la corriente nominal (equivalente a una impedancia de 0.28 por unidad) supuesta de normas de baja tensión, y es efectivamente la misma que multiplicando la impedancia subtransitoria por 1.67.

Con esta interpretación como una base, los siguientes tratamientos de motores de inducción son recomendados para obtener una sola combinación de cálculo de corriente de cortocircuito para el primer ciclo en sistemas industriales con diferentes niveles de tensión:

- a) Incluir motores conectados menores de 50HP, usando un factor multiplicativo DE 1.67 para impedancias subtransitorias, si están disponibles, o una impedancia estimada de primer ciclo de 0.28 basada en la capacidad nominal del motor.
- b) Incluir grandes motores usando los factores de multiplicación de impedancias de la Tabla 4.2-1. La mayoría de motores en baja tensión 50 HP y mayores están en el grupo de 1.2 veces la reactancia subtransitoria. Una estimación apropiada de este grupo es la impedancia de primer ciclo de 0.20 en por unidad basada en la capacidad nominal del motor.

Las dos últimas líneas de la Tabla 4-1 son remplazadas por la Tabla 4-2 para la combinación de redes recomendada.

La combinación única de la red de primer ciclo añade objetividad a ambos cálculos normales de baja y alta tensión. Aumentan las corrientes de cortocircuito del primer ciclo calculadas en alta tensión por las contribuciones de pequeños motores de inducción en baja tensión, cuando muchos motores son de 50 HP o mayores, adicionalmente de la contribución de grandes motores de inducción en baja tensión.

Tabla 4-2 MULTIPLICADORES DE REACTANCIA (O IMPEDANCIA) PARA MAQUINAS ROTATIVAS PARA UNA RED COMBINADA
(Cambios a la Tabla 4.2-2 para caculos en amplios sistemas con diferentes niveles de tensión)

Tipo de máquina rotativa	Red del primer ciclo (1ª red)	Red de interrupción (2ª red)
Motores de inducción:		
Todos los demás, 50 HP y mayores	1.2 Xd''*	3.0 Xd'' ⁺
Todos los menos de 50 HP	1.67 Xd'' [±]	Ninguno

* O un estimado para la red de primer ciclo X=0.20 por unidad basado en la capacidad nominal del motor

⁺ O un estimado para la red de primer interrupción X=0.50 por unidad basado en la capacidad nominal del motor

[±] O un estimado para la red de primer ciclo X=0.28 por unidad basado en la capacidad nominal del motor

Una vez establecida la red del primer ciclo, y estas impedancias convertidas y reducidas a una sola impedancia equivalente en por unidad Z_{pu} (o reactancia X_{pu}) para cada punto de falla de interés, la corriente de cortocircuito simétrica es calculada dividiendo la tensión de operación de pre-falla en por unidad E_{pu} entre Z_{pu} (o X_{pu}) y multiplicando por la corriente base:

$$I_{cc\ sim} = \frac{E_{pu}}{Z_{pu}} \cdot I_{base}$$

Donde I_{cc sim} es una corriente trifásica rms de cortocircuito simétrica del primer ciclo para una falla franca (cero impedancias en el punto de cortocircuito).

Si se siguen los procedimientos antes descritos las corrientes de cortocircuito calculadas para buses de baja tensión son ahora directamente aplicables para comparar con la capacidad nominal o capacidades de cortocircuito de interruptores de baja tensión, fusibles y otros equipos expresados como corrientes rms simétricas. Para interruptores de baja

tensión, las capacidades nominales incorporan una capacidad asimétrica como requisito para una relación X/R de 6.6 o menos (Fp de cortocircuito del 15% o mayor). Un sistema típico alimentado por un transformador con capacidad de 1000 o 1500 KVA usualmente tendrá una relación X/R de cortocircuito dentro de esos límites. Para sistemas más grandes o multi-transformadoras, es aconsejable verificar la relación X/R ; si es mayor que 6.6 la aplicación de interruptores o fusibles deberán ser basadas en las limitaciones de corriente asimétrica (ver IEEE Std.C37.13-1990).

Cuando la capacidad nominal o capacidades se expresan como corrientes rms (asimétricas) total del primer ciclo, o corrientes de cresta del primer ciclo, la corriente de cortocircuito simétrica debe ser multiplicada por el correspondiente factor multiplicativo encontrado en la norma aplicable para obtener el esfuerzo de corriente rms (asimétrica) total de primer ciclo o esfuerzo de corriente de cresta del primer ciclo apropiado para comparaciones.

Las capacidades de cierre y retención de interruptores de alta tensión preferentemente antes de 1987 (o capacidad momentánea de unidades más vejas) son unas corriente rms (asimétrica) total. El esfuerzo calculado del primer ciclo apropiado para comparación es obtenido cuando el multiplicador de 1.6 especificado en IEEE Std. C37.5-1979 y la reactancia X_{pu} en el punto de falla (o impedancia Z_{pu}) obtenida por la reducción de la red:

$$I_{cc\ total} = 1.6 \cdot \frac{E_{pu}}{X_{pu}} \cdot I_{base}$$

Donde $I_{cc\ sim}$ es la magnitud rms (asimétrica) total máxima de la corriente con la más alta asimetría durante el primer ciclo de un cortocircuito trifásico franco.

La capacidad de cierre y retención de interruptores de alta tensión preferiblemente después de 1987 son corrientes de cresta. El esfuerzo calculado del primer ciclo apropiado ara comparación es obtenido usando el multiplicador de 2.7 especificado en IEEE Std. C37.010-1979 y la reactancia X_{pu} en el punto de falla (o impedancia Z_{pu}) obtenida por la reducción de la red:

$$I_{cc\ cresta} = 2.7 \cdot \frac{E_{pu}}{X_{pu}} \cdot I_{base}$$

Donde $I_{cc\ cresta}$ es la cresta máxima posible para una de las corrientes durante el primer ciclo de un cortocircuito trifásico franco.

4.2.4.2 Esfuerzos interruptivos (de apertura de contactos) para interruptores de alta tensión (por encima de 1KV, incluyendo media tensión) (2ª RED)

Primero consideramos los esfuerzos para comparaciones con capacidades interruptivas de interruptores viejos con capacidades nominales anteriores a 1964 con capacidades basadas en la corriente rms total. Aplican los procedimientos de IEEE Std. C37.5-1979.

Los factores multiplicativos para las reactancias de máquinas rotativas en la red son obtenidas de la columna “Red de interrupción” de las Tablas 4-1 Y 4-2.

En el punto de cortocircuito, se busca reducir las reactancias de la red a una sola reactancia equivalente X_{pu} y reducir las resistencias de la red a una sola resistencia equivalente R_{pu} . Seguidamente se procede a determinar la relación X/R dividiendo X_{pu} entre R_{pu} ; Se determina la tensión de operación de pre-falla E_{pu} y se calcula la relación E/X dividiendo E_{pu} entre X_{pu} .

Seleccione el factor de multiplicación para la corrección de la relación E/X de las curvas de las Figuras 4-3 y 4-4. Para usar las curvas es necesario conocer los tiempos de apertura de contactos del interruptor, así como la proximidad de generadores (locales o remotos) al punto de cortocircuito. Los factores multiplicativos para generadores locales solo aplican cuando los generadores que son de contribución predominante se localizan eléctricamente cerca de la falla como se define en el subtítulo de la Figura 4-3 y Figura 4-5

Los tiempos mínimos de apertura de contactos son usados y son definidos en la Tabla 4-3 Seguidamente se multiplica E_{pu}/X_{pu} por el factor multiplicativo y la corriente base:

$$\text{Factor multiplicativo} \cdot \frac{E_{pu}}{X_{pu}} \cdot I_{base}$$

Esto es el esfuerzo interruptivo de corriente de cortocircuito rms total (39mplementa), 39mplement, franca y de tiempo de apertura de contactos para ser comparado con la capacidad interruptiva de los interruptores. Para interruptores viejos con capacidad interruptiva trifásica total en MVA, la capacidad de corriente de cortocircuito en kA es encontrada dividiendo la capacidad en MVA entre $\sqrt{3}$ por la tensión de operación en kV cuando la tensión esta entre los límites de capacidad máxima y mínima

$$\text{Capacidad interruptiva asimétrica} = \frac{\text{Capacidad interruptiva en MVA}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje de operación en KV}}$$

El cálculo con el límite mínimo de tensión es aplicado para baja tensión.

Luego, se consideran los esfuerzos para comparación con capacidades (interruptivas) de cortocircuito de interruptores con capacidades nominales posteriores a 1964 basados en la corriente rms simétrica. Los procedimientos especificados en IEEE Std. C37.010-1979 se aplican para los cálculos de esfuerzos de dichos interruptores.

Las relaciones E/X y X/R para un punto de falla dado se realizan como se especificó en cálculos anteriores. [6]

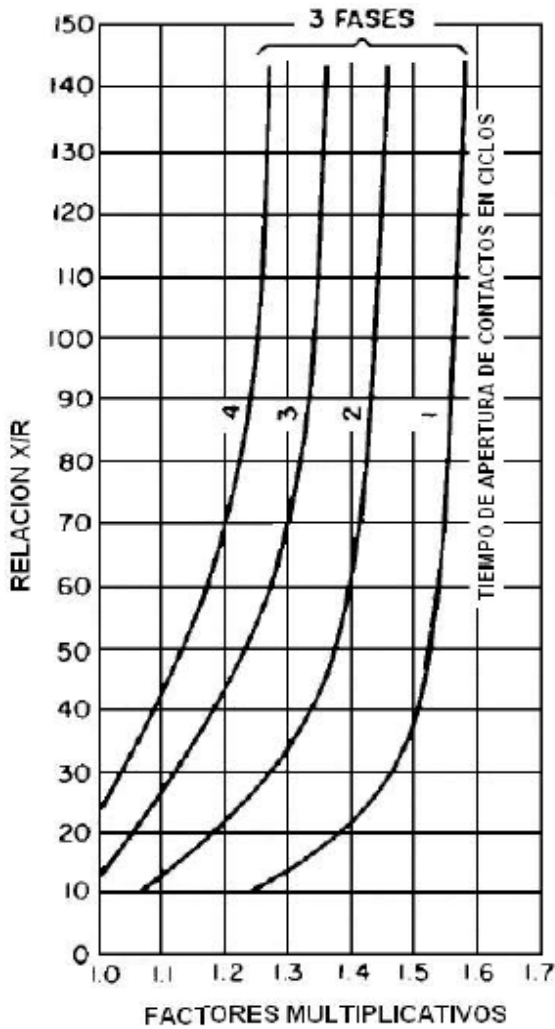


Figura 4-3 Factores multiplicativos (capacidades basados en la corriente rms total) para fallas trifasicas (local)

NOTA: Alimentación predominante desde generadores a través de no más de una transformación ó con la reactancia externa en serie menor de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del genrador (IEEE Std. C37.5.1979).

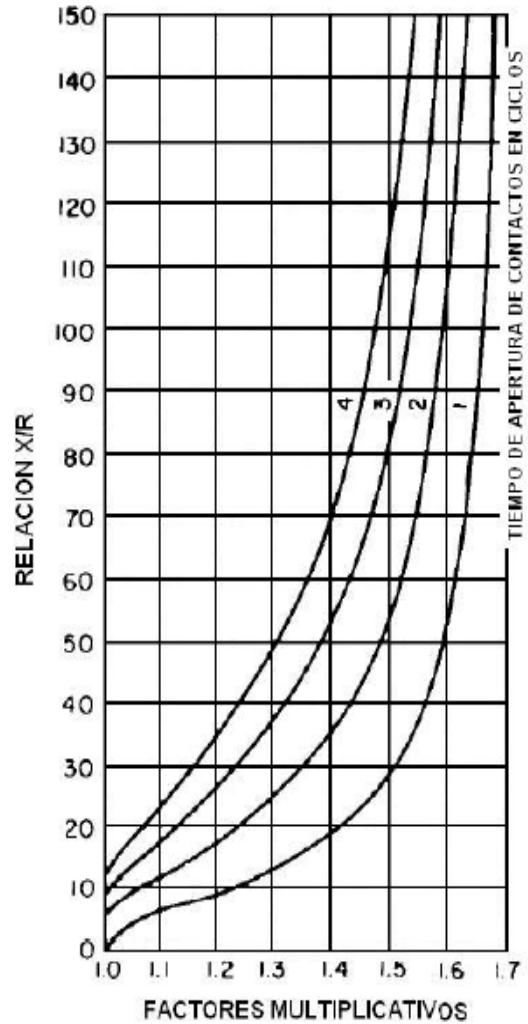


Figura 4-4 Factores multiplicativos (capacidades basados en la corriente rms total) para fallas trifasicas y de linea a tierra(local)

NOTA: Alimentación predominante a través de dos ó más transformadores ó con la reactancia externa en serie igual o mayor de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del genrador (IEEE Std. C37.5.1979).

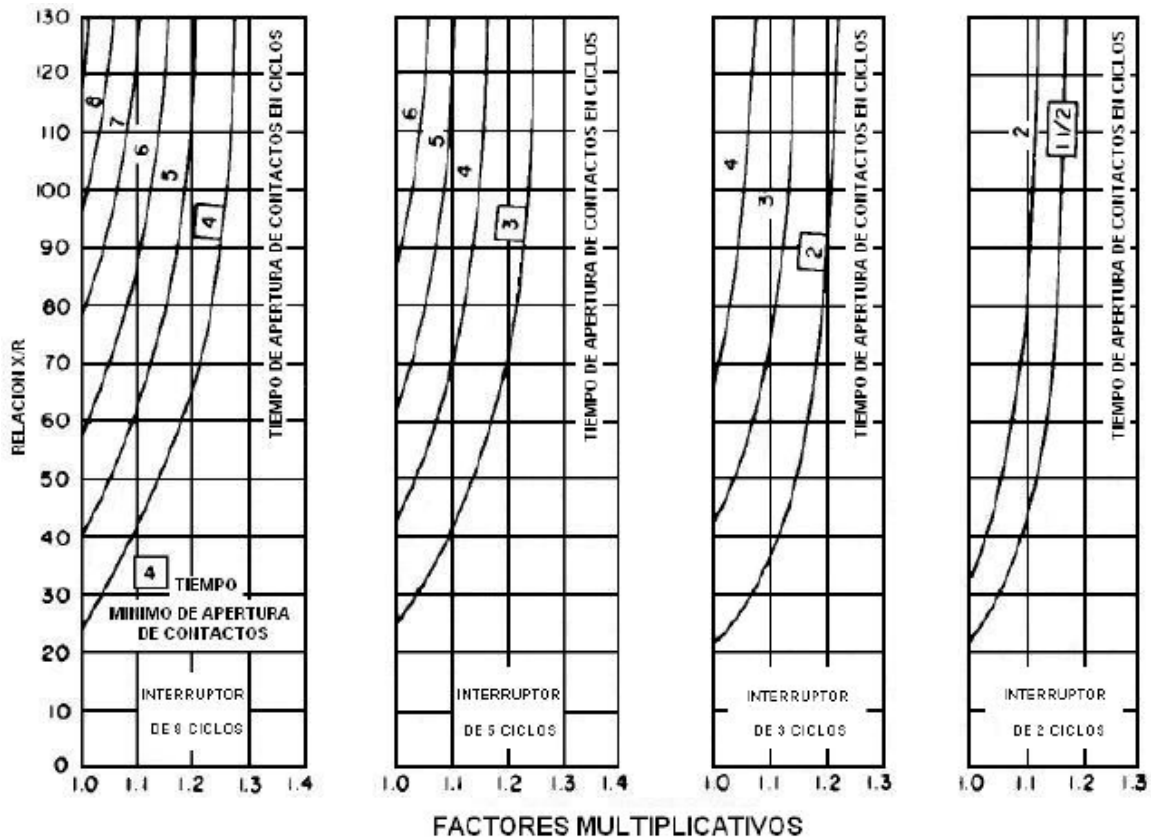


Figura 4-5 Factores multiplicativos para fallas trifásicas
Alimentación predominantemente de generadores (local)

NOTA: A través de no más de una transformación ó con reactancia externa en serie menor de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador (IEEE Std. C37.010.1979)

Tabla 4-3 DEFINICIÓN DE TIEMPO MINIMO DE APERTURA DE CONTACTOS PARA INTERRUPTORES DE C.A. DE ALTA TENSIÓN

Tiempo nominal de interrupción en ciclos a 60 HZ	Tiempos mínimo de apertura de contactos en ciclos a 60 HZ
8	4
5	3
3	2
2	1.5

Fuente: Basado en IEEE Std. C37.010-1979 e IEEE Std. C37.5-1979

Se selecciona el factor multiplicativo para la corriente de E/X de las curvas de las Figuras 4-5 y 4-6. Para hacer uso de estas curvas es necesario conocer los tiempos de apertura de contactos del interruptor así como la proximidad de generadores al unto de falla (local ó remoto) como lo anterior. [6]

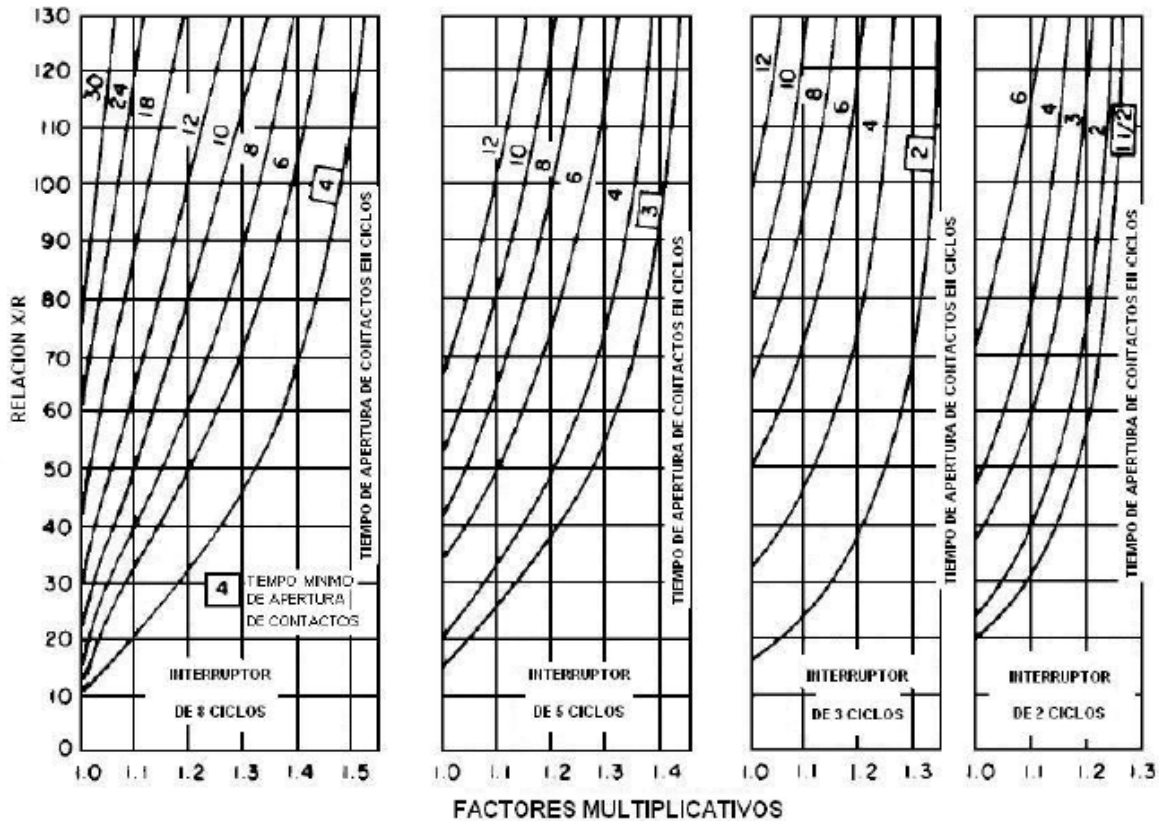


Figura 4-6 Factores multiplicativos para fallas trifásicas y de línea a tierra
Alimentación predominantemente de generadores (remoto)

NOTA: A través de dos o más transformaciones ó con reactancia externa en serie igual o mayor a 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador (IEEE Std. C37.010.1979)

Multiplicar E_{pu}/X_{pu} por el factor multiplicativo y la corriente base:

$$\text{Factor multiplicativo} \cdot \frac{E_{pu}}{X_{pu}} \cdot I_{base}$$

El resultado es el esfuerzo interruptivo de corriente de cortocircuito rms calculado para ser comparado con la capacidad interruptiva de corriente simétrica (basada a la potencia) de un interruptor. (Note que el esfuerzo de interrupción calculado es realmente simétrico sólo si el factor multiplicativo para E/X es 1.0). La capacidad interruptiva de corriente simetría de los interruptores es calculada como:

$$\text{Capacidad interruptiva simetrica} = \frac{(I_{cc} \text{ a capacidad nominal})(E_{MAXIMO} \text{ a capacidad nominal})}{E \text{ de operación}}$$

Esta corriente calculada no excederá la capacidad interruptiva de corriente simétrica máxima seleccionada para el interruptor.

El procedimiento de cálculo descrito para las redes del primer ciclo y de interrupción, son diferentes en varias referencias de procedimientos detallados, en las primeras ediciones de la norma ANSI/IEEE 141-4. Las diferencias responden con más precisión para contribuciones del esfuerzo de interrupción en alta tensión de grandes motores de inducción, para el decaimiento exponencial de la componente de CD de la corriente de cortocircuito y para el decaimiento de CA de contribuciones de generadores cercanos.

4.2.4.3 Corrientes de cortocircuito para dispositivos relevadores con retardo de tiempo (3ª RED)

Para la aplicación de relevadores instantáneos, el valor de la corriente de cortocircuito del primer ciclo determinado por la red del primer ciclo debe ser usado. Para una aplicación de relevadores con retardo de tiempo más allá de 6 ciclos, la representación de la red del sistema equivalente debe incluir solo generadores y elementos pasivos, tales como transformadores y cables entre generadores y el punto de cortocircuito. Los generadores son representados por la impedancia transitoria o una impedancia más grande relacionada a la magnitud del decaimiento de la corriente del generador en el tiempo especificado del cálculo. Todas las contribuciones de motores son omitidas. Solo los generadores que contribuyen con la corriente de cortocircuito a través del relevador bajo consideración para el punto de cortocircuito son considerados para aplicación de relevadores. La componente de CD tendrá un decaimiento cercano a cero y no es considerada.

La corriente rms simétrica de cortocircuito es:

$$\frac{E_{pu}}{X_{pu}}$$

Dónde: X_{pu} es derivada de la reactancia de la red equivalente, consistiendo de generadores y equipos pasivos (cables, transformadores, etc.) en la corriente de cortocircuito encaminados a ser protegidos por los relevadores. [6]

5. CAPÍTULO 5 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGIAS IEC Y ANSI/ IEEE PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

En este capítulo se busca realizar un análisis comparativo de las normas IEC Y ANSI/ IEEE; para lo cual se hará énfasis en los aspectos más relevantes de estas normas, lo cual servirá como base para el análisis comparativo.

En estos tiempos se hace conveniente y necesario un análisis comparativo de las dos normas para conocer las diferencias, y similitudes más relevantes entre ellas y así usar adecuadamente esta información en las diferentes aplicaciones de los estudios de corto circuito.

5.1 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE LAS NORMAS IEC Y ANSI/IEEE PARA EL ESTUDIO COMPARATIVO

Como se explicó en capítulos anteriores de corto existen los decaimientos de CA y de CD. La consideración y cálculo de estos decaimientos son fundamentales en la determinación de las corrientes de corto circuito en los dos procedimientos de las normas IEC y ANSI. Los esfuerzos correspondientes a las corrientes de corto circuito dependen en gran medida del cálculo de los decaimientos de CA y CD; Es muy importante determinar correctamente estos decaimientos ya que los resultados finales de estudios de análisis de fallas se usen en la determinación de la capacidad de los equipos de protección y en su coordinación.

El decaimiento de CA está relacionado con el incremento de las reactancias en las máquinas a partir del momento se establece la corriente de corto circuito, pasando de un valor conocido como reactancia subtransitoria, luego a la reactancia transitoria, hasta llegar a la reactancia síncrona. Por su parte, el decaimiento de CD está relacionado con el instante exacto de interrupción y con las propiedades de amortiguamiento del circuito interrumpido.

La consideración de los decaimientos CA y CD llevan una fuerte complejidad en la modelación y determinación de las corrientes de corto circuito. La complejidad aumenta al considerar sistemas eléctricos que contienen varias máquinas, Pero se pueden realizar algunas suposiciones sobre los modelos de los componentes de los sistemas eléctricos que ayudan a reducir la complejidad y realizar análisis matemáticos de menor dificultad, estas suposiciones son unas de las características principales que diferencian los procedimientos planteados por las normas IEC y ANSI/IEEE para el cálculo de corrientes de cortocircuito.

5.1.1 Corrientes y esfuerzos IEC y ANSI/IEEE

Según las normas IEC y ANSI se realiza el cálculo de las corrientes de falla listadas en la Tabla 5.1-1, Se listan de esta manera para indicar que son correspondientes.

Tabla 5-1 CORRIENTES Y ESFUERZOS IEC Y ANSI/IEEE

Tipo de Esfuerzo	Corriente Según La ANSI 141	Corriente Según la IEC 909
1	Primer Ciclo o Momentáneo	Inicio ($I''K$)
2	Cerrado – Trabado	Pico (I_p)
3	Interrupción	Ruptura (I_b)
4	Retardo de tiempo	Estado Permanente

5.1.2 Aspectos de modelación del decaimiento de AC

La norma ANSI/IEEE para los cálculos de corrientes simétricas de interrupción, especifica factores multiplicadores para las reactancias subtransitorias y transitorias de las maquinas rotativas. Estos multiplicadores están en función del tipo de esfuerzo teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde el inicio de la falla, el tamaño de las máquinas, y la velocidad. Estos multiplicadores son independientes de la proximidad de las máquinas al punto de falla y del tiempo de accionamiento de los interruptores.

La norma IEC no recomienda factores multiplicadores de ajuste para las reactancias de carga rotatoria. El decaimiento AC es modelado considerando el tipo de máquina, el tamaño y la velocidad, el tiempo de accionamiento de los interruptores y la proximidad de las máquinas al punto de falla. El procedimiento de la IEC no se basa en curvas para modelar el decremento AC para generadores.

La Norma ANSI/IEEE clasifica la falla como “local” o “remota”, del generador a la falla. En cambio, el IEC clasifica las fallas como “cercana” o “lejana” al generador (Factor que influye en el decremento AC). En la IEC, el concepto de falla “cercana” o “lejana” es muy importante en la modelación de máquinas para cálculo de corriente de falla de ruptura y en estado permanente, dado que se simplifican los cálculos.

5.1.3 Aspectos de modelación del decaimiento de DC

La norma ANSI recomienda aplicar multiplicadores a las corriente simétricas de falla para obtener las corrientes asimétricas. Esta es una característica fundamental de la norma ANSI/IEEE para el cálculo del decaimiento de DC, es la relación X/R en el punto de falla [11]. Para desarrollar los cálculos de corriente de cortocircuito según esta norma se requiere una red de reactancias para determinar la reactancia equivalente (reactancia de Thevenin) en el punto de falla y una red, separada, de resistencias de red para determinar una resistencia equivalente (resistencia de Thevenin). La relación X/R es requerida para determinar los multiplicadores necesarios.

La norma IEC no considera que se deba calcular una sola relación X/R. Este procedimiento, se aplica cuando existen fuentes independientes que alimentan la falla y para estos casos se hace uso del principio de superposición.

5.1.4 Tensiones de prefalla.

La norma ANSI/IEEE recomienda una tensión de prefalla de 1.0 p.u. en el bus fallado, por otro lado la norma IEC recomienda aplicar diversos factores de multiplicación de tensión de prefalla para tomar en cuenta las derivaciones del transformador, las cargas del sistema, el comportamiento subtransitorio de las máquinas rotatorias, etc. Estos factores son denominados factor “C” para el cálculo de la tensión, el cual se determina dependiendo tanto del nivel de tensión requerido como los tipos de corriente a calcular ya sean corriente de fallas máximas o mínimas.

En la aplicación de factores de tensión de prefalla la norma IEC recomienda algunos ajustes a la impedancia equivalente de las redes de alimentación y de los generadores. Los ajustes toman en cuenta la carga del generador antes de la falla y el factor de tensión. En algunos casos esto puede extenderse a los transformadores asociados con las plantas de generación.

6. CAPÍTULO 6 PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL

6.1 CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE USO FINAL

6.1.1 Clasificación según el capítulo 8 del reglamento de instalaciones eléctricas (RETIE)

Para el caso colombiano se clasifican las instalaciones eléctricas de uso final según el capítulo 8, artículo 27 del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) de la siguiente manera:

CAPITULO 8. REQUISITOS PARA INSTALACIONES DE USO FINAL

ARTICULO 27°. REQUISITOS GENERALES PARA LAS INSTALACIONES DE USO FINAL

27.6 CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE USO FINAL:

Las instalaciones para uso final de la electricidad se clasifican en:

- a. Instalaciones básicas.
- b. Instalaciones provisionales.
- c. Instalaciones especiales.

ARTICULO 28° REQUISITOS ESPECÍFICOS SEGÚN EL TIPO DE INSTALACIÓN

28.1 INSTALACIONES BÁSICAS

Son aquellas instalaciones de baja complejidad y riesgo, que se ciñen a los primeros cuatro capítulos de la NTC 2050 Primera Actualización (Código Eléctrico Colombiano), y las redes externas de baja tensión, tanto para uso particular, como destinadas a la prestación del servicio público de electricidad. [1]

28.2 INSTALACIONES PROVISIONALES

Aquellas instalaciones que se hacen para suministrar el servicio de energía a un proyecto en construcción, con un tiempo de vigencia hasta la energización definitiva de la construcción o la terminación de la construcción, o para el suministro de energía en instalaciones transitorias a ferias o espectáculos, no mayor a seis meses (prorrogables según el criterio del Operados de Red que preste el servicio).

Debe tener un tablero o sistema de distribución provisional con protección de falla a tierra, excepto para los equipos que no lo permitan porque la protección diferencial puede causar mayor riesgo. [1]

Todo circuito debe tener una protección de sobre corriente, con el encerramiento apropiado contra contacto directo o indirecto de personas. [1]

28.3 INSTALACIONES ESPECIALES

Son aquellas instalaciones que por estar localizadas en ambientes clasificados como peligrosos o por alimentar equipos o sistemas complejos, presentan mayor probabilidad de riesgo que una instalación básica y por tanto, requieren de medidas especiales, para mitigar o eliminar tales riesgos.

28.3.1 Instalaciones eléctricas en lugares clasificados como peligrosos.

28.3.2 Instalaciones en instituciones de asistencia médica.

28.3.3 Lugares con alta concentración de personas.

28.3.4 Edificaciones prefabricadas.

28.3.5 Edificios para usos agrícolas o pecuarios.

28.3.6 Viviendas móviles, vehículos recreativos, remolques estacionados.

28.3.7 Casas flotantes y palafíticas.

28.3.8 Instalación de equipos especiales.

28.3.9 Piscinas, fuentes e instalaciones similares.

28.3.10 Sistemas integrados y sistemas solares fotovoltaicos.

28.3.11 Sistemas contra incendio.

28.3.12 Sistemas de emergencia.

28.3.13 Otros sistemas de suministro.

6.1.2 Clasificación según el capítulo 10 del reglamento de instalaciones eléctricas (RETIE)

Seguidamente se deben clasificar las instalaciones eléctricas de uso final según el capítulo 1, Artículo 10 del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), con esta clasificación se busca saber qué tipo de diseño requiere la instalación a analizar; si el diseño es de tipo simplificado (No se exige el cálculo de corrientes de cortocircuito) o de tipo detallado (Se exige el cálculo de corrientes de cortocircuito). [1]

CAPITULO 1: DISPOSICIONES GENERALES

ARTICULO 10°: DISPOSICIONES GENERALES DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

10.1 DISEÑO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Toda instalación eléctrica a la que le aplique el **RETIE**, debe contar con un diseño realizado por un profesional o profesionales legalmente competentes para desarrollar esa actividad. El diseño podrá ser detallado o simplificado según el tipo de instalación. [1]

10.1.1 Diseño Detallado: El Diseño detallado debe ser ejecutado por profesionales de la ingeniería cuya especialidad esté relacionada con el tipo de obra a desarrollar y la competencia otorgada por su matrícula profesional, conforme a las Leyes 51 de 1986 y 842 de 2003. Las partes involucradas con el diseño deben atender y respetar los derechos de autor y propiedad intelectual de los diseños. La profundidad con que se traten los temas dependerá de la complejidad y el nivel de riesgo asociado al tipo de instalación y debe contemplar los ítems que le apliquen de la siguiente lista:

- a. Análisis y cuadros de cargas iniciales y futuras, incluyendo análisis de factor de potencia y armónicos.
- b. Análisis de coordinación de aislamiento eléctrico.
- c. **ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO Y FALLA A TIERRA.**
- d. Análisis de nivel de riesgo por rayos y medidas de protección contra rayos.
- e. Análisis de riesgos de origen eléctrico y medidas para mitigarlos.
- f. Análisis del nivel tensión requerido.
- g. Cálculo de campos electromagnéticos para asegurar que en espacios destinados a actividades rutinarias de las personas, no se superen los límites de exposición definidos en la Tabla 14.1
- h. Cálculo de transformadores incluyendo los efectos de los armónicos y factor de potencia en la carga.
- i. Cálculo del sistema de puesta a tierra.
- j. Cálculo económico de conductores, teniendo en cuenta todos los factores de pérdidas, las cargas resultantes y los costos de la energía.
- k. Verificación de los conductores, teniendo en cuenta el tiempo de disparo de los interruptores, la corriente de cortocircuito de la red y la capacidad de corriente del conductor de acuerdo con la norma IEC 60909, IEEE 242, capítulo 9 o equivalente.
- l. Cálculo mecánico de estructuras y de elementos de sujeción de equipos.
- m. Cálculo y coordinación de protecciones contra sobrecorrientes. En baja tensión se permite la coordinación con las características de limitación de corriente de los dispositivos según IEC 60947-2 Anexo A.
- n. Cálculos de canalizaciones (tubo, ductos, canaletas y electroductos) y volumen de encerramientos (cajas, tableros, conduletas, etc.).
- o. Cálculos de pérdidas de energía, teniendo en cuenta los efectos de armónicos y factor de potencia.
- p. Cálculos de regulación.
- q. Clasificación de áreas.
- r. Elaboración de diagramas unifilares.
- s. Elaboración de planos y esquemas eléctricos para construcción.
- t. Especificaciones de construcción complementarias a los planos, incluyendo las de tipo técnico de equipos y materiales y sus condiciones particulares.
- u. Establecer las distancias de seguridad requeridas.
- v. Justificación técnica de desviación de la **NTC 2050** cuando sea permitido, siempre y cuando no comprometa la seguridad de las personas o de la instalación.
- w. Los demás estudios que el tipo de instalación requiera para su correcta y segura operación, tales como condiciones sísmicas, acústicas, mecánicas o térmicas.

Nota 1. La profundidad con que se traten los ítems dependerá del tipo de instalación, para lo cual debe aplicarse el juicio profesional del responsable del diseño.

Nota 2. El diseñador deberá hacer mención expresa de aquellos ítems que a su juicio no apliquen.

10.1.2 Diseño Simplificado: El diseño simplificado podrá ser realizado por ingeniero o tecnólogo de la especialidad profesional acorde con el tipo de instalación y que esté relacionada con el alcance de la matrícula profesional. Igualmente, el técnico electricista que tenga su certificación de competencia en diseño eléctrico otorgada en los términos de la Ley 1264 de 2008, podrá realizar este tipo de diseño.

El diseño simplificado se aplica para los siguientes casos:

- (a) Instalaciones eléctricas de vivienda unifamiliar o bifamiliares y pequeños comercios o pequeñas industrias de capacidad instalable mayor de 7 kVA y menor o igual de 15 kVA, tensión no mayor a 240 V, no tengan ambientes o equipos especiales y no hagan parte de edificaciones multifamiliares o construcciones consecutivas objeto de una misma licencia o permiso de construcción que tengan más de cuatro cuentas del servicio de energía y se especifique lo siguiente:
 - Análisis de riesgos de origen eléctrico y medidas para mitigarlos.
 - Diseño del sistema de puesta a tierra.
 - Cálculo y coordinación de protecciones contra sobrecorrientes.
 - Cálculos de canalizaciones y volumen de encerramientos (tubos, ductos, canaletas, electroductos).
 - Cálculos de regulación.
 - Elaboración de diagramas unifilares.
 - Elaboración de planos y esquemas eléctricos para construcción.
 - Establecer las distancias de seguridad requeridas.

- (b) Ramales de redes aéreas rurales de hasta 50 kVA y 13,2 kV, por ser de menor complejidad. El diseño simplificado debe basarse en especificaciones predefinidas por el operador de red y cumplir lo siguiente:
 - Análisis de riesgos de origen eléctrico y medidas para mitigarlos.
 - Diseño de puesta a tierra.
 - Protecciones contra sobrecorriente y sobretensión.
 - Elaboración de planos y esquemas eléctricos para construcción.
 - Especificar las distancias mínimas de seguridad requeridas.
 - Definir tensión mecánica máxima de conductores y templetes.

10.1.3 Casos de reemplazo del diseño: Para las instalaciones de edificaciones para uso domiciliario o similar, clasificadas como instalaciones básicas cuya capacidad instalable sea menor o igual a 7 KVA, que no hagan parte de edificaciones con más de 4 cuentas, ni contemplen instalaciones especiales, el diseño se podrá reemplazar por un esquema o plano de construcción, basado en especificaciones predefinidas, que debe suscribir con su

nombre, cédula de ciudadanía, número de matrícula profesional y firma el técnico, tecnólogo o ingeniero responsable de la construcción de la instalación y entregarlo al propietario de la instalación, el cual deberá conservarlo para el mantenimiento y posteriores reparaciones de la instalación y se anexará copia con la declaración de cumplimiento para efectos de legalización de la instalación con el operador de la red.

En el esquema o plano de construcción que sustituye el diseño deberá evidenciarse y precisarse los siguientes aspectos:

- a. Que se cumplen las distancias mínimas de seguridad a partes expuestas de redes eléctricas y no se invaden servidumbres de líneas de transmisión.
- b. El tipo y ubicación del sistema de puesta a tierra, especificando el tipo de electrodo, sus dimensiones así como el calibre y tipo del conductor de puesta a tierra.
- c. Identificación de la capacidad y tipo de las protecciones de sobrecorriente, acorde con la carga y calibre del conductor de cada circuito.
- d. Un diagrama unifilar de la instalación y el cuadro de carga de los circuitos.
- e. La localización de tablero de medición, tablero de distribución, tipo y diámetro de tubería, número y calibres de conductores, interruptores y tomacorrientes y demás aparatos involucrados en la instalación eléctrica. [1]

6.2 DIAGRAMA DE FLUJO REPRESENTATIVOS DE PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL

A continuación se muestran 3 diagramas de flujo por medio de los cuales se presenta la metodología diseñada para el análisis de corrientes de cortocircuito en instalaciones eléctricas de uso final, donde el primero de ellos presenta el procedimiento detallado y los criterios a tener en cuenta para realizar el análisis inicial a una instalación eléctrica de uso final con el fin de determinar si según la normatividad Colombia requiere de un análisis detallado de corrientes de cortocircuito; El segundo diagrama presenta el procedimiento para realizar este cálculo según la norma IEC 60909-0 y el tercer diagrama presenta el procedimiento a seguir si se desea realizar este cálculo según la norma ANSI/IEEE 141-4.

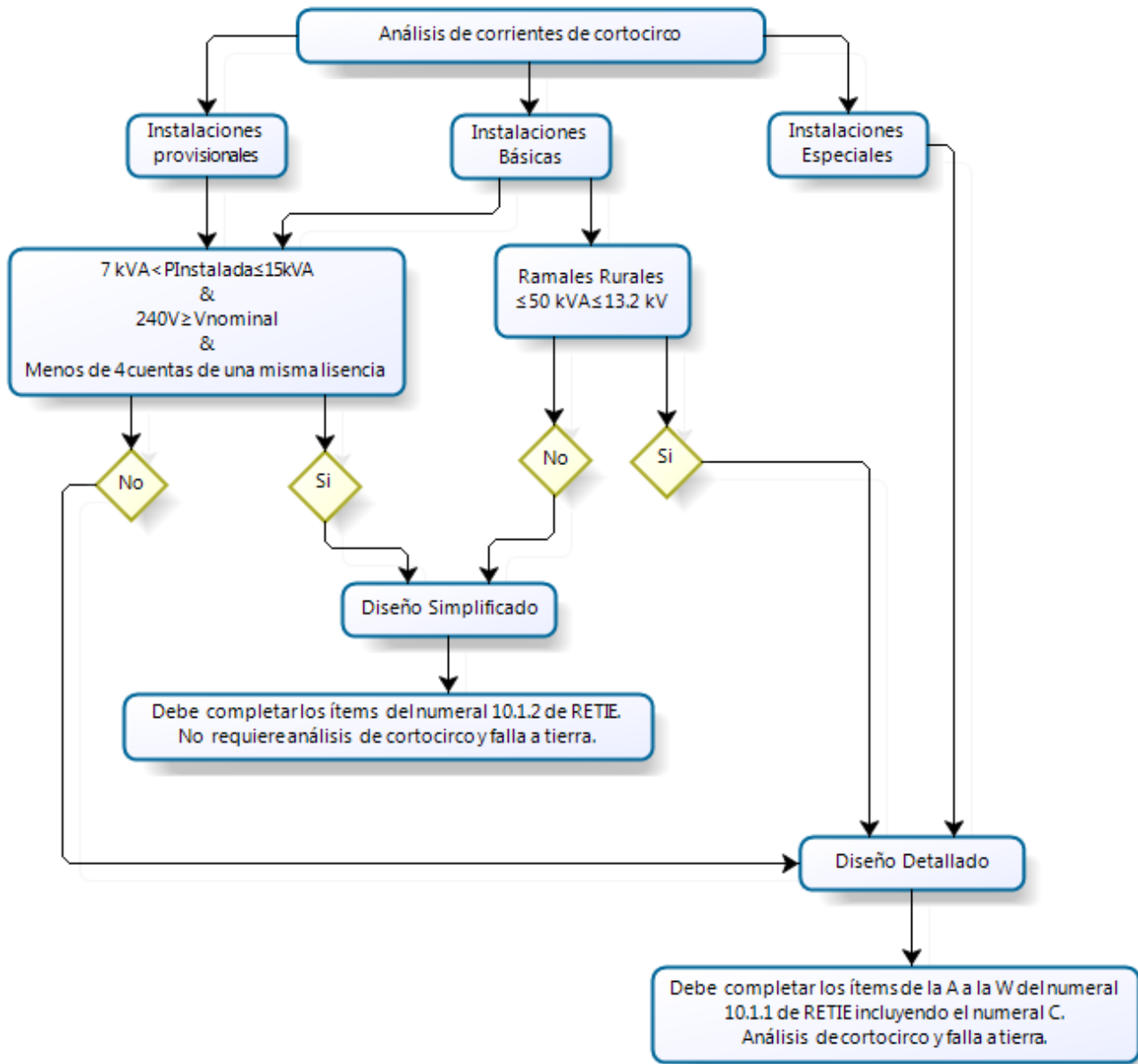


Figura 6-1 La Análisis inicial de instalaciones eléctricas de uso final según normatividad colombiana

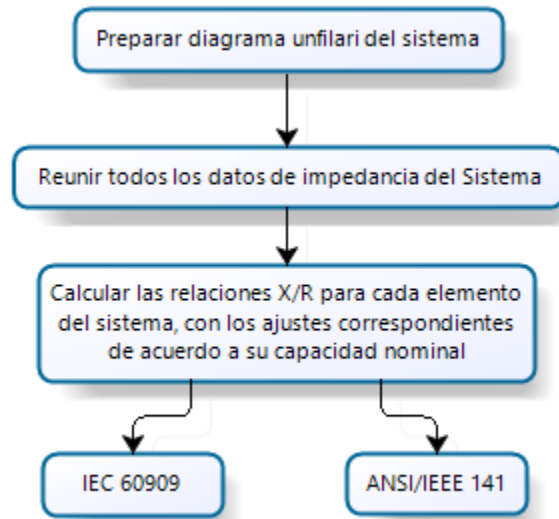


Figura 6-2 Análisis inicial de instalaciones eléctricas de uso final según normatividad colombiana

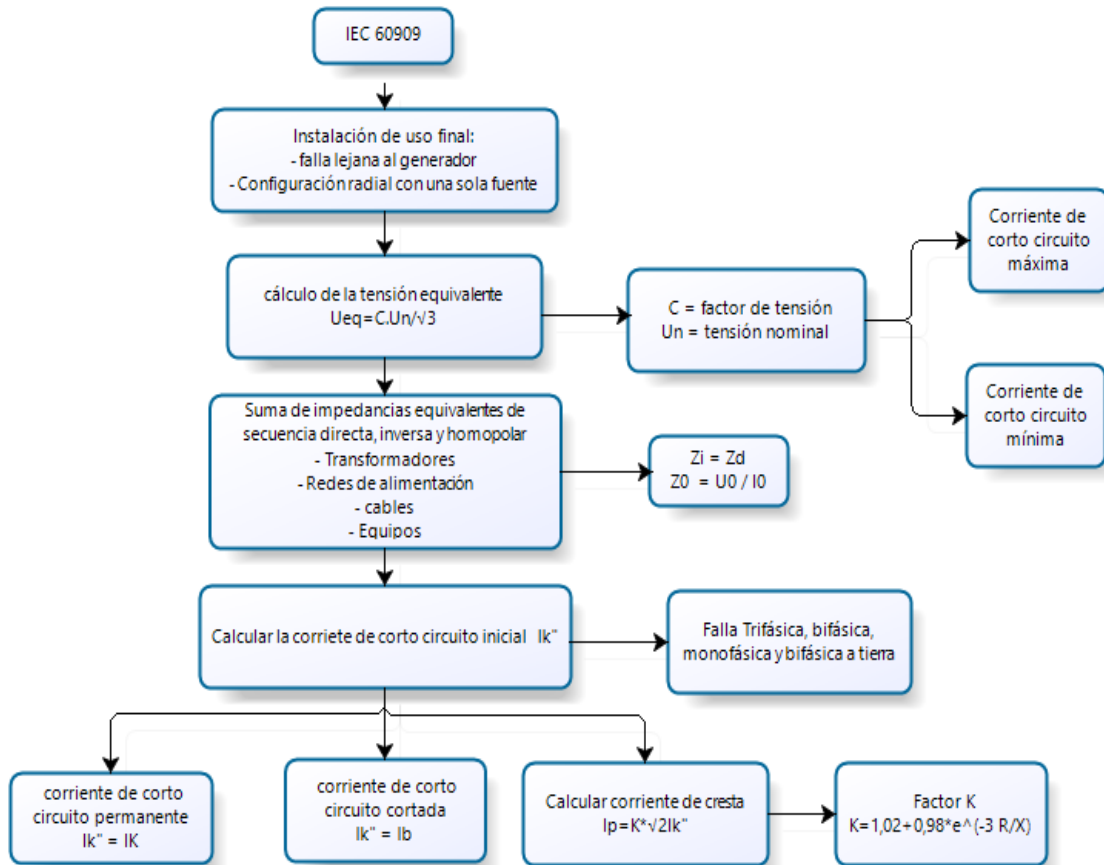


Figura 6-3 Diagrama de Flujo para caculo de corrientes de cortocircuito según IEC60909-0

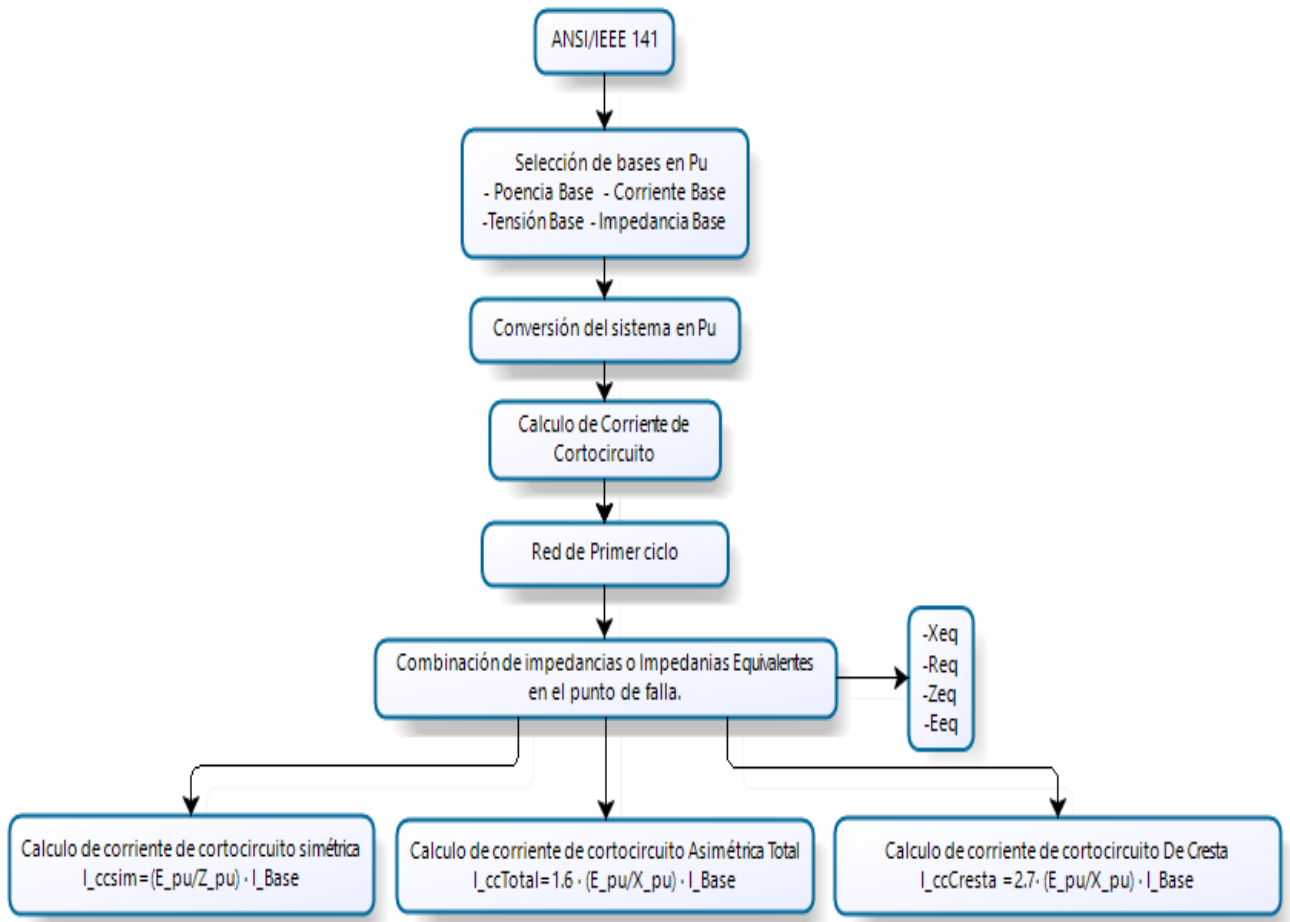


Figura 6-4 Diagrama de Flujo para caculo de corrientes de cortocircuito según ANSI/IEEE 141-4

6.3 OTRAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO NECESARIOS PARA UN CORRECTO CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

A continuación se presentan algunas consideraciones de diseño que son necesarias para poder realizar un buen cálculo de las corrientes de cortocircuito en un sistema eléctrico, como lo es elaborar un diagrama unifilar con todos los datos necesarios para posteriores cálculos además de todas las especificaciones técnicas del proyecto como determinar las longitudes, calibres y tipo de conductores a utilizar, tipo y capacidad del transformador, así como las protecciones y puntos de falla analizar.

6.3.1 Elaboración de un diagrama unifilar de la instalación eléctrica de uso final

Se debe realizar el diseño de un diagrama unifilar detallado el cual contenga todos los elementos que lo conforman con sus características obteniendo una idea general de la

instalación eléctrica, desde la acometida hasta los circuitos ramales. Un buen diagrama unifilar debe contener los siguientes parámetros:

- Cantidad, calibre y longitud de los conductores.
- Caja de Medidor.
- Diámetro de la Tubería.
- Numero de circuitos de los tableros.
- Conexión a tierra.

Para la correcta elaboración e interpretación de los diagramas unilares se hace uso del capítulo 1, Artículos 4, 5 y 6 del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE).

CAPITULO 1: DISPOSICIONES GENERALES

ARTICULO 4º: ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

Se presenta un listado de las abreviaturas, acrónimos y siglas más comúnmente utilizadas en el Sector Eléctrico. [1]

Tabla 6-1 ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS DE COMÚN UTILIZACIÓN DEL RETIE

ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS DE COMÚN UTILIZACIÓN	
AT	Alta Tensión
BT	Baja Tensión
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MT	Media Tensión
NTC	Norma Técnica Colombiana
rms	Root mean square. Valor eficaz de una señal

Fuente: Adaptación del RETIE 2013

ARTICULO 5º: SISTEMAS DE UNIDADES

En las instalaciones objeto del presente reglamento se debe aplicar el Sistema Internacional de Unidades (SI), aprobado por la Resolución No. 1823 de 1991 de la Superintendencia de Industria y Comercio. En consecuencia, los siguientes símbolos y nombres tanto de magnitudes como de unidades deben utilizarse en las instalaciones eléctricas. [1]

Tabla 6-2 ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS DE COMÚN UTILIZACIÓN DEL RETIE

NOMBRE DE LA MAGNITUD	SÍMBOLO DE LA MAGNITUD	NOMBRE DE LA UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD – SI
Corriente eléctrica	I	amperio	A
Factor de potencia	FP	uno	1
Frecuencia	F	hertz	Hz
Fuerza electromotriz	E	voltio	V
Impedancia	Z	ohmio	Ω
Potencia activa	P	vatio	W
Reactancia	X	ohmio	Ω
Resistencia	R	ohmio	Ω
Tensión o potencial eléctrico	V	voltio	V

Fuente: Adaptación del RETIE 2013

Se deben tener en cuenta las siguientes reglas para el uso de símbolos y unidades:

- a. No debe confundirse magnitud con unidad.
- b. El símbolo de la unidad será el mismo para el singular que para el plural.
- c. Cuando se va a escribir o pronunciar el plural del nombre de una unidad, se usarán las reglas de la gramática española.
- d. Cada unidad y cada prefijo tiene un solo símbolo y este no debe ser cambiado. No se deben usar abreviaturas.
- e. Los símbolos de las unidades se denotan con letras minúsculas, con la excepción del ohmio (Ω) letra mayúscula omega del alfabeto griego. Aquellos que provienen del nombre de personas se escriben con mayúscula.
- f. El nombre completo de las unidades se debe escribir con letra minúscula, con la única excepción del grado Celsius, salvo en el caso de comenzar la frase o luego de un punto.
- g. Las unidades sólo podrán designarse por sus nombres completos o por sus símbolos correspondientes reconocidos internacionalmente.
- h. Entre prefijo y símbolo no se deja espacio.
- i. El producto de símbolos se indica por medio de un punto.
- j. No se colocarán signos de puntuación luego de los símbolos de las unidades, sus múltiplos o submúltiplos, salvo por regla de puntuación gramatical, dejando un espacio de separación entre el símbolo y el signo de puntuación.

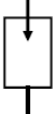



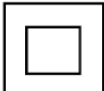


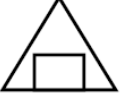
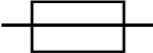






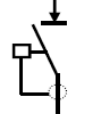
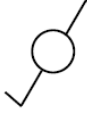





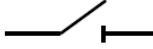







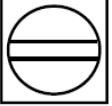
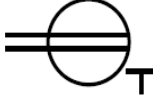

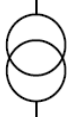
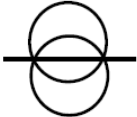

ARTICULO 6°: SIMBOLOGIA Y SEÑALIZACIÓN

6.1 SÍMBOLOS ELÉCTRICOS

Son de obligatoria aplicación los símbolos gráficos contemplados en la Tabla 6.1, tomados de las normas unificadas **IEC 60617**, **ANSI Y32**, **CSA Z99** e **IEEE 315**, los cuales guardan mayor relación con la seguridad eléctrica. Cuando se requieran otros símbolos se pueden tomar de las normas precitadas. [1]

Tabla 6-3 SÍMBOLOS ELÉCTRICOS PARA ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS UNIFILARES

Caja de empalme	Corriente continua	Central hidráulica en servicio	Central térmica en servicio	Conductores de fase	Conductor neutro
Conductor de puesta a tierra	Conmutador unipolar	Contacto de corte	Contacto con disparo automático	Contacto sin disparo automático	Contacto operado manualmente

					
Descargador de sobretensiones	Detector automático de incendio	Dispositivo de protección contra sobretensiones - DPS	DPS tipo varistor	Doble aislamiento	Empalme
					
Equipotencialidad	Extintor para equipo eléctrico	Fusible	Generador	Interruptor, símbolo general	Interruptor automático en aire
					
Interruptor bipolar	Interruptor con luz piloto	Interruptor unipolar con tiempo de cierre	Interruptor diferencial	Interruptor unipolar de dos vías	Interruptor seccionador para AT
					
Interruptor termomagnético	Lámpara	Masa	Parada de emergencia	Seccionador	Subestación
					
Tablero general	Tablero de distribución	Tierra	Tierra de protección	Tierra aislada	Tomacorriente, símbolo general
					
Tomacorriente en el piso	Tomacorriente monofásico	Tomacorriente trifásico	Transformador símbolo general	Transformador de aislamiento	Transformador de seguridad

Fuente: Adaptación del RETIE 2013

6.4 ELECCIÓN DE CONDUCTORES: CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE USO OBLIGATORIO SEGÚN EL RETIE

En la cadena de producción y utilización de la energía eléctrica, los cables y conductores eléctricos juegan un papel importante por cuanto constituyen el principal elemento de transporte. En el RETIE, Artículo 17 Numeral 1 Alambres y Cables, se establecen requisitos esenciales que deben cumplir los conductores eléctricos; es interesante el hecho de que para alambres y cables desnudos de cobre y aluminio se establecen dos sistemas de calibres, el americano establecen dos sistemas de calibres, el americano (AWG y kcmil) y el sistema de calibres métricos en mm².

- AWG: American Wire Gauge.
- Kcmil: kilo circular mil o miles de circular mil (1cmil = Área de un círculo de una milésima de pulgada de diámetro).

El hecho de mayor trascendencia para el diseño y construcción de las instalaciones internas (comúnmente llamadas instalaciones domiciliarias e industriales) es que el RETIE en el Capítulo VII Artículo 40, establece la obligatoriedad de la NTC 2050, en los capítulos que tienen relación con los conductores de energía eléctrica; éstos son:

- Capítulo 1: Definiciones y requisitos generales para instalaciones eléctricas.
- Capítulo 2: Requisitos de alambrado y protección de las instalaciones eléctricas.
- Capítulo 3: Métodos y materiales de las instalaciones.
- Capítulo 4: Requisitos de instalación para equipos y elementos de uso general.
- Capítulo 5: Requisitos para ambientes especiales.
- Capítulo 6: Requisitos para equipos especiales.
- Capítulo 7: Condiciones especiales de las instalaciones.

El RETIE establece que se debe cumplir con la NTC 2050, la cual indica que los calibres de todos los cables deben ser en el sistema americano (AWG y kcmil), sin embargo, las Tablas 32 y 33 del Artículo 17 del RETIE abren la posibilidad de especificar calibres en mm².

6.4.1 Conductores para instalaciones de uso final: interiores

La Sección 310 de la NTC 2050 establece requisitos generales de los conductores y sus denominaciones de tipos, aislamiento, rótulos, etiquetas, resistencia mecánica, capacidad de corriente nominal y usos.

Si no se especifica otra cosa, los conductores son de cobre. El calibre mínimo para utilizar debe ser 14 AWG en cobre. Cuando van instalados en canalizaciones, los conductores de calibre 8 AWG y mayores deben ser del tipo cableados, es decir, no se aceptan conductor sólido o alambre.

Tabla 6-4 CONDUCTORES PARA INSTALACIONES INTERIORES

Nombre	Temperatura de Operación		Materiales		Rangos de calibre	Norma	
	Seco o húmedo	Mojado	Aislamiento	Chaqueta	AWG-Kcmil	UL	Equivalente NTC
THHN/THWN	90°C	75°C	PVC (Termoplastico retardante a la llama)	Nylon	14-2000	UL 83	NTC 1332
XHHW	90°C	75°C	XLPE (polietileno reticulado termoendurecible resistente a la humedad y retardante a la llama)	N/A	14-2000	UL 44	NTC3277
RHW-2	90°C	90°C					
RHW	75°C	75°C					
RHW-2	90°C	90°C					

Fuente: Adaptación de Tabla 310-13 de la NTC 2050

Para la selección de los calibres para conductores de tierra se hace uso de la tabla 250.95 de la NCT 2050.

Tabla 6-5 CALIBRE MÍNIMO DE LOS CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA DE EQUIPOS PARA PUESTA A TIERRA DE CANALIZACIONES Y EQUIPOS.

Corriente nominal o ajuste máximo del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, tubos conduit, etc. (A)	Sección Transversal			
	Alambre de cobre		Alambre de aluminio o de aluminio revestido de cobre *	
	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
15	2,08	14	3,30	12
20	3,30	12	5,25	10
30	5,25	10	8,36	8
40	5,25	10	8,36	8
60	5,25	10	8,36	8
100	8,36	8	13,29	6
200	13,29	6	21,14	4
300	21,14	4	33,62	2
400	26,66	3	42,20	1
500	33,62	2	53,50	1/0
600	42,20	1	67,44	2/0
800	53,50	1/0	85,02	3/0
1.000	67,44	2/0	107,21	4/0
1.200	85,02	3/0	126,67	250 kcmil
1.600	107,21	4/0	177,34	350 kcmil
2.000	126,26	250 kcmil	202,68	400 kcmil
2.500	177,34	350 kcmil	304,02	600 kcmil
3.000	202,68	400 kcmil	304,02	600 kcmil
4.000	235,25	500 kcmil	405,36	800 kcmil
5.000	354,69	700 kcmil	608,04	1.200 kcmil
6.000	405,36	800 kcmil	608,04	1.200 kcmil

Fuente: Tabla 310-16 de la NTC 2050

Para la selección de los calibres para conductores de fase y neutro se hace uso de la tabla 310.16 de la NCT 2050.

Tabla 6-6 AMPACIDAD DE CORRIENTE PERMISIBLE EN CONDUCTORES AISLADOS PARA 0 A 2 000 V NOMINALES Y 60 °C A 90 °C. NO MÁS DE TRES CONDUCTORES PORTADORES DE CORRIENTE EN UNA CANALIZACIÓN, CABLE O TIERRA (DIRECTAMENTE ENTERRADOS) Y TEMPERATURA AMBIENTE DE 30 °C.

Sección transv.	Temperatura nominal del conductor (ver Tabla 310-13)						Calibre
	60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C	
	TIPOS TW* UF*	TIPOS FEPW*, RH*,RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*,ZW*	TIPOS TBS, SA, SS,FEP*, FEPB*,MI,RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*,USE-2, XHH, XHHW*, XHHW-2,ZW-2*	TIPOS TW* UF*	TIPOS RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, USE*	TIPOS TBS, SA, SS,, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, RHH*, RHW-2, USE-2,XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
mm ²	COBRE			ALUMINIO 0 ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			AWG o kcmils
0,82	-	-	14	-	-	-	18
1,31	-	-	18	-	-	-	16
2,08	20*	20*	25	-	-	-	14
3,30	25*	25*	30*	20*	20*	25*	12
5,25	30	35	40*	25	30*	35*	10
8,36	40	50	55	30	40*	45	8
13,29	55	65	75	40	50	60	6
21,14	70	85	95	55	65	75	4
26,66	85	100	110	65	75	85	3
33,62	95	115	130	75	90	100	2
42,20	110	130	150	85	100	115	1
53,50	125	150	170	100	120	135	1/0
67,44	145	175	195	115	135	150	2/0
85,02	165	200	225	130	155	175	3/0
107,21	195	230	260	150	180	205	4/0
126,67	215	255	290	170	205	230	250
152,01	240	285	320	190	230	255	300
177,34	260	310	350	210	250	280	350
202,68	280	335	380	225	270	305	400
253,35	320	380	430	260	310	350	500
304,02	355	420	475	285	340	385	600
354,69	385	460	520	310	375	420	700
380,02	400	475	535	320	385	435	750
405,36	410	490	555	330	395	450	800
465,03	435	520	585	355	425	480	900
506,70	455	545	615	375	445	500	1.000
633,38	495	590	665	405	485	545	1.250
760,05	520	625	705	435	520	585	1.500
886,73	545	650	735	455	545	615	1.750
1.013,40	560	665	750	470	560	630	2.000
FACTORES DE CORRECCIÓN							
Temp. Ambiente en °C	Para temperaturas ambientes distintas de 30°C, multiplicar las anteriores corrientes por el correspondiente factor de los siguientes						Temp. Ambiente en °C
21-25	1,08	1,05	1,04	1,08	1,05	1,04	21-25
26-30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	26-30
31-35	0,91	0,94	0,96	0,91	0,94	0,96	31-35
36-40	0,82	0,88	0,91	0,82	0,88	0,91	36-40
41-45	0,71	0,82	0,87	0,71	0,82	0,87	41-45
46-50	0,58	0,75	0,82	0,58	0,75	0,82	46-50
51-55	0,41	0,67	0,76	0,41	0,67	0,76	51-55
56-60		0,58	0,71		0,58	0,71	56-60
61-70		0,33	0,58		0,33	0,58	61-70
			0,41			0,41	71-80

6.4.2 Conductores para instalaciones de uso final: acometidas

La Sección 338 de la NTC 2050 establece requisitos generales de los cables de acometida, los cuales están conformados por un conjunto de uno o varios conductores con o sin cubierta interior; pueden ser del tipo SER, SEU o USE. El calibre mínimo de los cables de acometida de cobre no debe ser inferior a 8 AWG.

Tabla 6-7 CONDUCTORES DE ACOMETIDA

Nombre	Temperatura de operación		Número de conductores		Materiales		Rango de calibres	Norma	
	Seco o húmedo	Mojado	Fase	Neutro	Aislamiento	Chaqueta	AWG-Kcmil	UL	Equivalente NTC
SER	90°C	75°C	1 a 5	1	Termoplástico ó termoestable	Resistente a la luz solar	8- 4/0	UL 854	NTC 4564
SEU	90°C	75°C		0 ó 1					
USE	90°C	75°C ó 90°C		0 ó 1	Termoestable	Opcional	8- 200		

Fuente: Adaptación de Tabla 310-13 de la NTC 2050

6.4.3 Conductores para instalaciones de uso final: media tensión

La Sección 326 establece requisitos generales para los Cables de Media Tensión (MV Medium Voltage) que es un cable monopolar o multiconductor con aislamiento dieléctrico sólido para uso en más de 2000 V.

Tabla 6-8 CONDUCTORES PARA MEDIA TENSIÓN

Nombre	Temperatura de operación	Número de conductores	Materiales			Rango de calibres	Norma	
	Seco o húmedo	Fase	Aislamiento	Pantalla	Chaqueta	AWG-Kcmil	UL	Equivalente NTC
MV	90°C ó 105°C	1 ó 3	XLPE (polietileno Reticulado) – ó EPR (caucho de Etileno Propileno) Termoestable	Cinta de cobre o hilos de cobre	Termoplástico	8- 2000	UL 1072	NTC 2186

Fuente: Adaptación de Tabla 310-13 de la NTC 2050

Tabla 6-9 CALIBRES MÍNIMOS SE ESTABLECEN PARA LOS DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN

Tensión (KV)	5	8	15	25	35
Calibre Mínimo (AWG)	8	6	2	1	1/0

**Tabla 6.4-5 REACTANCIAS PARA TRES CONDUCTORES SENCILLOS EN DUCTO TIPO COUNDIT
CATÁLOGO DE CENTELSA**

Calibre	Tipo de conductor							
	PVC o Aluminio	Acero	PVC	Aluminio	Acero	PVC	Aluminio	Acero
	Conductor de cobre o Aluminio		Conductor de cobre			Conductor de Aluminio		
AWG o Kcmil	Reactancia Inductiva *XL		Resistencia a CA a 75°C *			Resistencia a CA a 75 °C*		
14	0.190	0.240	10.17	10.17	10.17	-	-	-
12	0.177	0.233	5.56	6.56	6.56	10.49	10.49	10.49
10	0.164	0.207	3.94	3.94	3.94	6.56	6.56	6.56
8	0.171	0.213	2.56	2.56	2.56	4.27	4.27	4.27
6	0.167	0.210	1.61	1.61	1.61	2.66	2.66	2.66
4	0.157	0.197	1.02	1.02	1.02	1.67	1.67	1.67
2	0.148	0.187	0.623	0.656	0.656	1.05	1.05	1.05
1	0.151	0.187	0.525	0.525	0.525	0.820	0.853	0.820
1/0	0.144	0.180	0.394	0.427	0.394	0.656	0.689	0.656
2/0	0.141	0.177	0.328	0.328	0.328	0.525	0.525	0.525
3/0	0.138	0.171	0.253	0.269	0.259	0.427	0.427	0.427
4/0	0.135	0.167	0.203	0.219	0.207	0.328	0.361	0.328
250	0.135	0.171	0.171	0.187	0.177	0.279	0.295	0.282
300	0.135	0.167	0.144	0.161	0.148	0.233	0.249	0.236
350	0.131	0.164	0.125	0.141	0.128	0.200	0.217	0.207
400	0.131	0.161	0.108	0.125	0.115	0.177	0.194	0.180
500	0.128	0.157	0.089	0.105	0.095	0.141	0.157	0.158
600	0.129	0.157	0.075	0.092	0.082	0.118	0.135	0.125
750	0.125	0.157	0.062	0.079	0.069	0.095	0.112	0.102
1000	0.121	0.151	0.049	0.062	0.059	0.075	0.089	0.082

6.5 PROTECCIONES ELÉCTRICAS

6.5.1 Fusibles para protección de transformadores

Criterios de selección:

Como regla general, los siguientes factores deben ser considerados para la selección del fusible del lado primario de un transformador. Una descripción más amplia de cada ítem puede consultarse en la norma RA8002

- Tensión Nominal.
- Capacidad de interrupción.
- Capacidad de sobrecarga.
- Soportabilidad a corriente Inrush (Magnetización y Cold Load).
- Protección contra fallas en el secundario del transformador.
- Coordinación con fusibles de respaldo.

6.5.2 Fusibles para protección de ramales

Criterios de selección:

Para la selección del fusible que sirve de protección del ramal o aisladero deberá tenerse presente los siguientes factores.

- Tensión nominal.
- Capacidad de interrupción.
- Carga del ramal (kVA).
- Coordinación con dispositivos aguas arriba (relés, reconectores o fusibles) y aguas abajo (fusibles).

6.5.3 Los interruptores automáticos

Su funcionamiento se basa en un **elemento térmico**, formado por una lámina bimetálica que se deforma al pasar por la misma una corriente durante cierto tiempo, para cuyas magnitudes está dimensionado (sobrecarga) y un **elemento magnético**, formado por una bobina cuyo núcleo atrae un elemento que abre el circuito al pasar por dicha bobina una corriente de valor definido (cortocircuito).

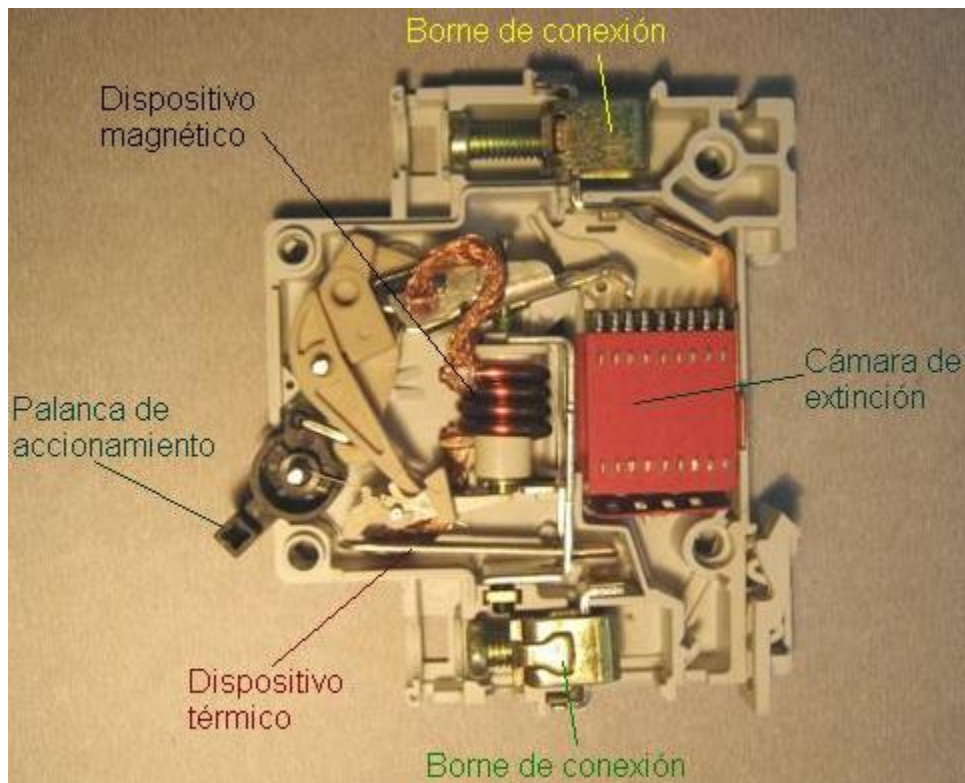


Figura 6-5 Interruptores automáticos

Protección contra sobrecargas: Su característica de disparo es a tiempo dependiente o inverso, es decir que a mayor valor de corriente es menor el tiempo de actuación.

Protección contra cortocircuitos: Su característica de disparo es a tiempo independiente, es decir que a partir de cierto valor de corriente de falla la protección actúa, siempre en el mismo tiempo.

La desconexión puede ser:

Automática: Magnética, por cortocircuito y térmica, por sobrecargas.

Manual: mecánica

La reconexión es manual.

Las normas que rigen las características de disparo de las protecciones de los interruptores automáticos son: IEC 609 7 e IEC 60898.

Tabla 6-10 Longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección

Corriente de cortocircuito en el tablero principal [A]		1500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	
Sección del conductor Cu [mm ²]	Intensidad nominal del interruptor automático		Longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección [m]								
	IEC 60898	CDI*									
1,5	10	B	160	163	163	164	164	164	164	164	165
		C	77	80	81	81	81	81	82	82	82
		D	36	38	39	40	40	40	40	40	40
2,5	16	B	163	167	169	169	170	170	170	171	171
		C	77	81	83	83	84	84	84	85	85
		D	33	38	39	40	41	41	41	41	42
4	25	B	162	170	172	173	174	174	175	175	175
		C	73	81	83	84	85	86	86	86	87
		D	29	37	39	40	41	41	42	42	42
6	32	B	185	197	200	201	203	203	204	204	205
		C	81	93	95	97	98	99	100	100	101
		D	29	40	43	45	46	47	48	48	49
10	40	B	248	268	273	276	278	279	280	281	282
		C	104	124	129	132	134	135	136	137	138
		D	32	52	57	60	62	63	64	65	66
16	50	B	300	332	340	345	348	350	352	353	354
		C	118	150	158	163	166	168	170	171	172
		D	27	59	67	72	75	77	79	80	81
25	63	B	349	398	411	418	423	427	429	431	433
		C	125	174	187	194	199	203	205	207	209
		D	13	63	75	82	87	91	93	95	97
35	80	B	357	427	444	455	462	467	470	473	476
		C	109	179	196	206	213	218	222	225	227
		D	15	55	72	82	89	94	98	101	103
50	100	B	-	470	495	-	520	-	-	-	540
		C	-	185	210	-	235	-	-	-	255
		D	-	43	68	-	93	-	-	-	113
70	125	B	-	506	541	-	576	-	-	-	605
		C	-	182	217	-	253	-	-	-	281
		D	-	20	56	-	91	-	-	-	119

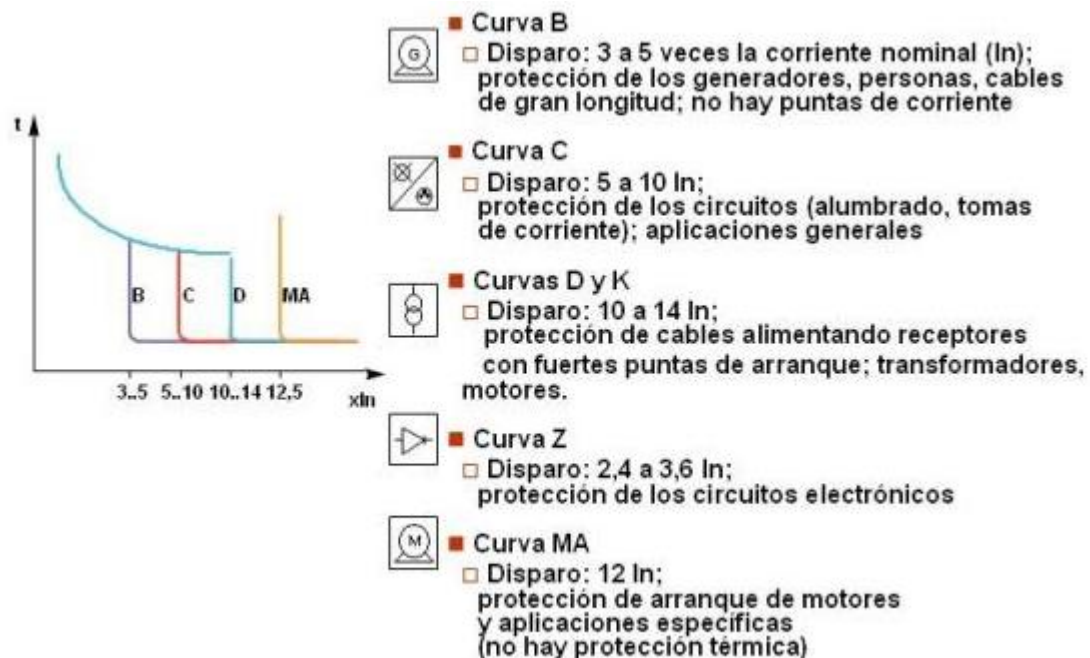


Figura 6-6 Curvas de disparo

6.6 DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE FALLA

Cuando un análisis de la normativa, en cuanto al diseño de instalaciones eléctricas como el especificado en el numeral 6.2 arroja que la instalación requiere del cálculo de corrientes de cortocircuito, se deben determinar los puntos clave en donde se deben calcular las corrientes de cortocircuito, lo cual busca generar bases sólidas en cuanto a criterios de diseño y poder seleccionar de manera adecuada los equipos en función de los requerimientos mínimos que estos deben cumplir con el fin de cumplir el objetivo principal de la normatividad “resguardar la vida”.

La protección de una instalación eléctrica se debe realizar en cada punto que se presenta una discontinuidad eléctrica, lo que corresponde casi siempre con un cambio de sección de los conductores. Esto involucra que la intensidad de la corriente de cortocircuito debe calcularse para cada uno de los diversos niveles de la instalación, para así, poder determinar las características de los componentes que deberán soportar o aislar la corriente de falla.

A continuación se definen aquellos puntos de un sistema eléctrico de uso final en los cuales casi siempre se presentan las características descritas anteriormente y que hacen que sea de gran importancia realizar el análisis de corriente de cortocircuito:

- ✓ Bornes del transformador.
- ✓ Salida de los tableros generales de baja tensión.
- ✓ Entrada a tableros secundarios.

Se hace indispensable el cálculo de corrientes de cortocircuito máxima y mínima en estos puntos dado que:

La corriente máxima de cortocircuito permite determina: el poder de corte de los interruptores automáticos,

O el poder de cierre de los dispositivos de maniobra, los calibres adecuados para conductores y demás componentes.

La corriente mínima de cortocircuito permite elegir: la curva de disparo de los interruptores automáticos y fusibles, especialmente cuando:

- La longitud de los cables es importante y/o la fuente o generador es relativamente de alta impedancia.
- La protección de las personas se basa en el funcionamiento de los interruptores automáticos o de los fusibles, lo que es el caso concreto de los sistemas de distribución con los esquemas de conexión a tierra del neutro (o regímenes de neutro). Recordemos que la corriente mínima de cortocircuito corresponde a un cortocircuito producido en el extremo una derivación protegida, cuando se produce un defecto bifásico (como por ejemplo ante una falla alejada de la protección en el extremo de una línea y con un solo transformador en servicio supliendo toda la carga.

7. CAPÍTULO 7 ESTUDIO Y DESARROLLO DE UN EJEMPLO PRÁCTICO DE ANÁLISIS DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO IMPLEMENTANDO LOS SIMULADORES DIGSILENT POWERFACTORY Y ETAP.

El tamaño y complejidad de muchos sistemas eléctricos modernos hacen imprácticos los cálculos manuales de corrientes de cortocircuito por el excesivo consumo de tiempo. Los computadores son generalmente usados para estudios importantes de cortocircuito. Pero a pesar de que los computadores estén disponibles, una comprensión de la naturaleza de las corrientes de cortocircuito y procedimientos de cálculo es esencial para realizar con un buen criterio los diseños eléctricos, para los cuales estos cálculos se utilizan, teniendo en cuenta que de esto depende que las instalaciones sean seguras y confiables para resguardar la vida de los seres humanos.

En este capítulo se aplica la metodología para el análisis de cortocircuito en instalaciones eléctricas de uso final planteada en el capítulo 6 haciendo uso de las normas IEC 60909 y ANSI/IEEE 141, para ello se utiliza el diseño eléctrico de un edificio residencial típico que sirve de prueba y que contiene los elementos necesarios para un estudio de corto circuito.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO DE LA INSTALACIONES ELÉCTRICA DE PRUEBA

El edificio seleccionado para el estudio de corrientes de cortocircuito, es un edificio residencial que consta de 13 pisos de apartamentos, donde el sótano es destinado a parqueaderos, subestación eléctrica y cuarto de máquinas para el sistema de bombeo de agua, el primer piso será utilizado para recepción y dos apartamentos. En el piso dos tres apartamentos con características iguales a los apartamentos del piso uno. En el tercer piso tres tipos de apartamentos con una carga instalada un poco inferior a los apartamentos del piso uno y dos. Los pisos cuatro al trece son todos iguales con tres apartamentos cada uno.

La instalación entonces cuenta con una barraje principal el cual alimenta un total de 36 tableros correspondientes a apartamentos, un tablero general para zonas comunes que suministra energía a un tablero de bombas de presión, un tablero de alumbrado al cuarto de bombas de presión, un tablero de áreas comunes (iluminación y tomas de áreas comunes del edificio), un tablero de ascensor, un tablero de alumbrado al foso del ascensor, un tablero de piscina. La potencia demandada, corriente, protecciones y longitudes para conductores de alimentación de estos tableros se observan en la tabla 7-1.

Tabla 7-1 DATOS DE CARGAS DE APARTAMENTOS

Descripción para el software	Descripción Real	Potencia [kVA]	Corriente [kA]	Protección seleccionada [A]	Longitud [m]
C-Barra 1	Acometida	45	124.9	3x125	10
APARTAMENTOS					
C-100	101-102	6,125	29.4	2X30	14
C-200	201,202,203	6,125	29.4	2X30	17
C-300	301,302,303	6	28.8	2X30	20
C-400	401,402,403	10	48	2X50	23
C-500	501,502,503	10	48	2X50	26
C-600	601,602,603	10	48	2X50	29
C-700	701,702,703	10	48	2X50	32
C-800	801,802,803	10	48	2X50	35
C-900	901,902,903	10	48	2X50	38
C-1000	1001,1002,1003	10	48	2X50	41
C-1100	1101,1102,1103	10	48	2X50	44
C-1200	1201,1202,1203	10	48	2X50	47
C-1300	1301	11	52.8	2X60	50
C-Barra 2	Barra 2	36000	99	3X100	3
C- G.Bombas1	Barra bombas 1	10	27,7	3X60	5
C- G.Bombas2	Barra bombas 2	10	27,7	3X50	2
C-Bombas 1	Bomba de agua 1	8	22,20	3X50	0.5
C-Bombas 2	Bomba de agua 1	8	22,20	3X50	0.5
C-Alumbrado Bombas	Alumbrado Bombas	2	16,6	1X20	0.5
C- Áreas comunes	Áreas Comunes	15,530	42,9	3X50	3
C-Ascensor	Ascensor	6	16,6	3X20	50
C-A. Ascensor	Alumbrado ascensor	4	33,33	1X40	3
C-Piscina	Piscina	7	33.65	2X40	3

7.2 ANÁLISIS INICIAL DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE PRUEBA SEGÚN NORMATIVIDAD COLOMBIANA.

Se procede a aplicar realizar el análisis inicial diseñado según la normatividad colombiana para verificar si es necesario implementar un cálculo de corrientes de cortocircuito a la instalación eléctrica de uso final.

- **Clasificación según el capítulo 8 del reglamento de instalaciones eléctricas (retie)**

a. Instalaciones especiales.

Según el **artículo 28.3 del RETIE** esta instalación está clasificada como especial ya que por alimentar equipos y sistemas complejos, presenta mayor probabilidad de riesgo que una instalación básica y por tanto, requiere de medidas especiales, para mitigar o eliminar tales riesgos y cumple con las siguientes clasificaciones.

28.3.3 Lugar con alta concentración de personas.

Esta sección aplica ya que la instalación eléctrica de prueba está diseñada para que en cualquier momento se puedan reunir simultáneamente más de 50 personas.

28.3.11 Sistema contra incendio.

Esta sección aplica ya que por ser considerado un lugar con alta concentración de personas requiere de uno sistemas contra incendio respaldado por el sistema de emergencia para suministrar energía a las bombas contra incendio las cuales se consideran una instalación especial por su importancia en los sistemas contra incendio como medio de seguridad en las edificaciones.

28.3.12 Sistema de emergencia.

Esta sección aplica ya que por ser considerado un lugar con alta concentración de personas requiere de un sistemas de emergencia, destinado a suministrar automáticamente energía eléctrica a sistemas de iluminación y de potencia o ambos, para las áreas y los equipos determinados por el diseñador de la instalación eléctrica tales como señales de salida, ventilación, alarma contra incendio, bombas contra incendio, ascensores, sistemas de comunicación y demás sistemas en los que la interrupción del suministro eléctrico puede producir serios peligros para la seguridad de la vida humana.

28.3.13 Otros sistemas de suministro.

Esta sección aplica ya que el sistema de prueba consta de fuentes de generación de energía eléctrica interconectadas. Son los equipos y circuitos destinados para el suministro, distribución y control de la electricidad de alumbrado o fuerza que requieren garantizar la continuidad del servicio.

Por las anteriores características y por la clasificación según el **Capítulo 10 Artículo 10.1.1** del reglamento de instalaciones eléctricas (RETIE) la instalación eléctrica de prueba requiere de un diseño detallado, el cual en el numeral c especifica la necesidad de un cálculo de corrientes de cortocircuito y falla a tierra.

7.3 ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA UNIFILAR DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE PRUEBA

El Diagrama unifilar del proyecto se crea en base a la topología de la red eléctrica de prueba. Se realiza un diagrama unifilar correspondiente en el Software de diseño AutoCAD el cual será la base para las simulaciones a implementar.

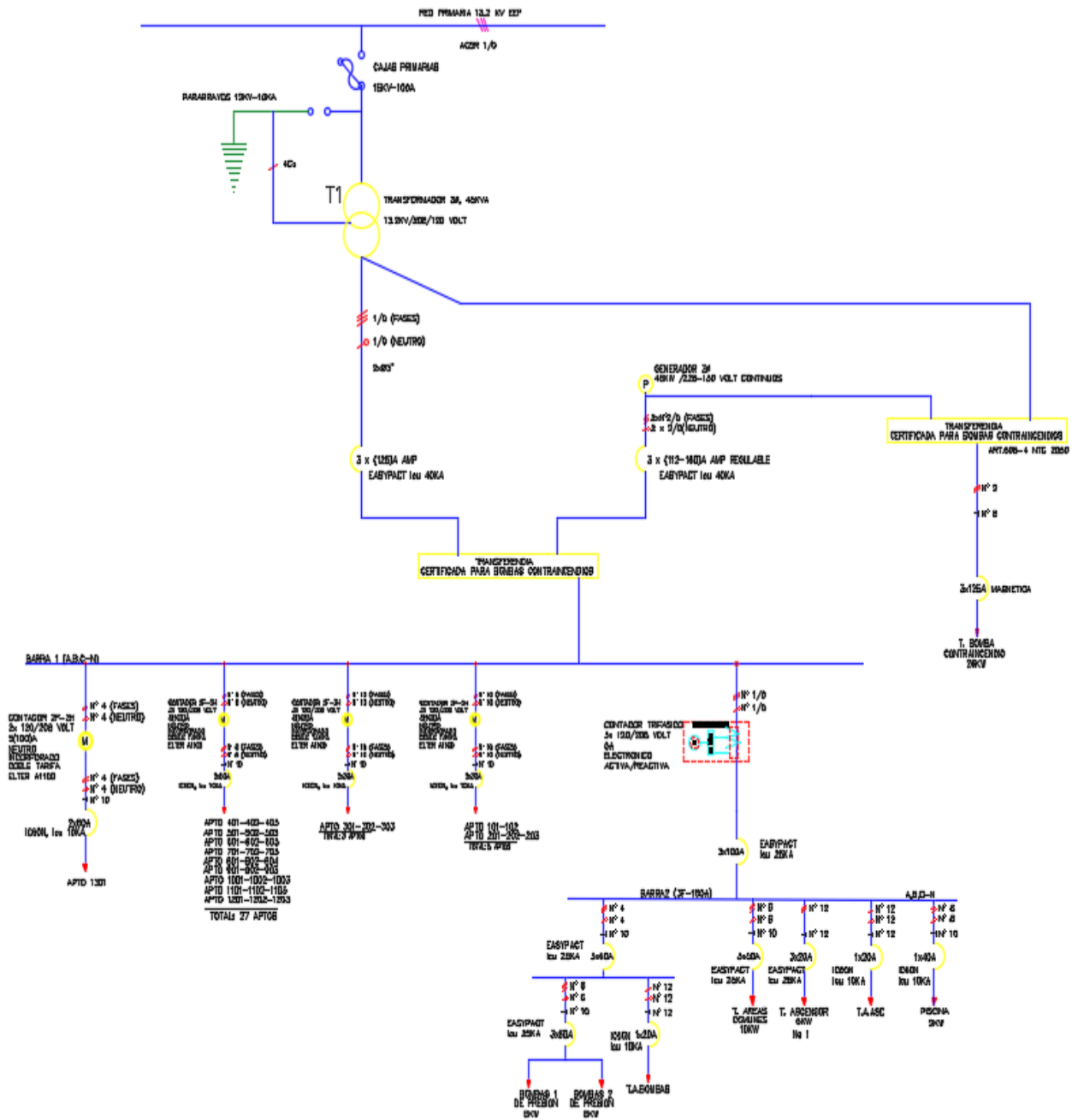


Figura 7-1 Diagrama unifilar de la instalación eléctrica de prueba.

7.3.1 Reducción del diagrama unifilar de la instalación eléctrica de prueba.

Se procede a realizar una simplificación del diagrama unifilar del proyecto con el fin de facilitar las simulaciones, para realizar esta simplificación se tienen en cuenta los elementos que aportan al cortocircuito y demás elementos que pueden incidir en la variación de los resultados de los cálculos de corrientes de cortocircuito.

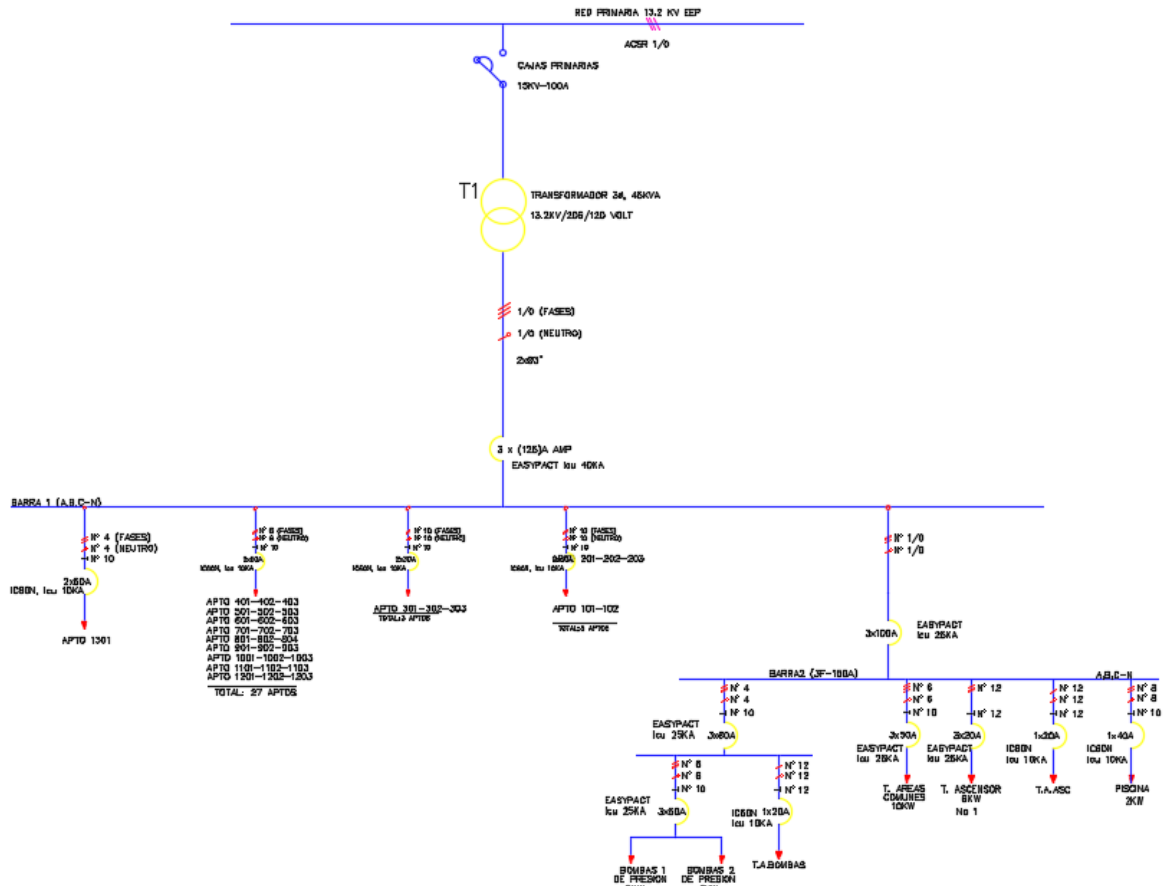


Figura 7-2 Diagrama unifilar simplificado de la instalación eléctrica de prueba.

7.4 DATOS DE IMPEDANCIAS DEL SISTEMA

Se hace necesario reunir todos los datos de impedancias de los elementos que conforman el diagrama unifilar. A continuación se presentan cada uno de los elementos que conforman la instalación de prueba a analizar con sus correspondientes datos de impedancia y demás datos que deben ser tenidos en cuenta para las simulaciones.

7.4.1 Alimentación

El punto de conexión para la red de baja tensión de este proyecto es suministrado por el operador de red local en base a una línea de 13.2kV con una capacidad de cortocircuito de 200 MVA y una relación $X/R = 3$.

7.4.2 Fusible

Se hace uso de un fusible tipo T para las cajas primarias que protegen los ramales o derivaciones de los circuitos de distribución de energía y como protección del transformador de distribución.

7.4.3 Transformador

El transformador utilizado en el proyecto es un transformador trifásico de 45 kVA, 13.200/208/120 V con una conexión delta-estrella aterrizada con:

Z %	X%	R%	X/R
3	0.57	2.94	5.12

7.4.4 Conductores

Los conductores a utilizar son marca centelsa de cobre y son escogidos de acuerdo a las capacidades de corriente según las tablas 250.95 y 310.16 de la NTE 2050, se presentan en la tabla 7-2

Tabla 7-2 Calibres de los conductores seleccionados para la instalación eléctrica de prueba.

Protección	Conductor de fase AWG	Conductor de Neutro AWG	Conductor de Tierra AWG
20	12	12	12
30	10	10	10
40	8	8	10
50	6	6	10
60	4	4	10
100	1	1	8
125	1/0	1/0	8

De acuerdo al tipo de conductores de cobre seleccionados y en ductos tipo conduit PVC se obtienen los respectivos valores de impedancias de secuencia positiva de acuerdo a la tabla 6-5 basada en el catálogo del fabricante. Las impedancias de secuencia cero en el sistema primario conectado al transformador son el doble de las impedancias de secuencia positiva ya que consideran ambos caminos de salida y retorno de las corrientes primarias. Este

procedimiento también supone que las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales y se presentan a continuación.

Tabla 7-3 Impedancias de cables usados para la instalación eléctrica de prueba.

Conductor AWG	Secuencia (+)		Secuencia (0)	
	Reactancia Inductiva *XL	Resistencia	Reactancia Inductiva *XL	Resistencia
12	0,177	5,56	0,354	11,12
10	0,164	3,94	0,328	7,88
8	0,171	2,56	0,342	5,12
6	0,167	1,61	0,334	3,22
4	0,157	1,02	0,314	2,04
1	0,151	0,525	0,302	1,05
1/0	0,144	0,394	0,288	0,788

Se realiza además la verificación de las longitudes de los conductores que asegura la actuación de las protecciones (elección de la intensidad asignada y características de disparo instantáneo de los interruptores termomagnéticos según IEC 60898).

La característica de disparo instantáneo de los interruptores termomagnéticos escogidos para esta instalación es del tipo C, y las corrientes de cortocircuito en el tablero principal oscilan entre 4 y 6 kA en base a estos datos y de acuerdo a la norma IEC 60898 se presenta en la tabla 7-4 las longitudes máximas en metros que pueden tener los conductores para la actuación instantánea de la protección

De acuerdo a esta tabla podemos asegurar una buena actuación de las protecciones seleccionadas dado que ninguna de estas distancias supera las distancias estipuladas, las cuales oscilan entre [0.5- 50] m.

Tabla 7-4 Verificación de la longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección.

Corriente de cortocircuito en el tablero principal [A]			1500	3000	4000	6000
Sección del conductor Cu [mm ²]	Intensidad nominal del interruptor automático		Longitud máxima de los conductores para la actuación instantánea de la protección [m]			
	IEC 60898	CDI*				
4	25	C	73	81	83	85
6	32	C	81	93	95	98
10	40	C	104	124	129	134
16	50	C	118	150	158	166
25	63	C	125	174	187	199
50	100	C	-	185	210	235
70	125	C	-	182	217	253

CDI* Característica de disparo instantáneo (comúnmente conocida como “curva”)

7.5 CASOS DE ESTUDIO

Se presentan 4 casos a implementar en los diferentes softwares con el fin de establecer diferencias entre los softwares utilizados y diferencias en el cálculo de corrientes de cortocircuito de acuerdo a las condiciones seleccionadas.

Tabla 7-5 Casos de estudio

Caso	Condición	Norma
1	Con conductores	IEC 60909
2	Si conductores	IEC 60909
3	Con conductores	ANSI/IEEE 141
4	Si conductores	ANSI/IEEE 141

Se decide implementar dos diferentes condiciones en las simulaciones con conductores y sin conductores, con el fin de verificar el efecto que se presenta en el cálculo de las corrientes de cortocircuito al tener y no tener en cuenta las impedancias de los conductores del sistema.

Caso 1: Con conductor

En el diagrama unifilar que se presenta para el caso uno se agrega un tablero de circuitos ramales por piso ya que las potencias demandadas, calibres y longitudes desde el tablero general tienen iguales características y no se hace entonces necesario agregar uno para cada apartamento ya que el valor de corriente de cortocircuito en estos casos sería el mismo, los demás tableros se presentan como en el modelo del diagrama unifilar diseñado en AutoCAD con los respectivos calibres y longitudes.

Caso 2: Sin conductor

En el diagrama unifilar que se presenta para el caso dos no presentar conductores y no se deben especificar tampoco las longitudes de estos desde el tablero general, por tanto se decide agregar solo 4 tableros para representar los diferentes cálculos de corriente de cortocircuito para los 13 pisos de apartamentos de acuerdo a la variación de carga de la siguiente manera.

T1: Representa los tableros del piso 1 y 2 con una Potencia de: 6.125 kVA

T2: Representa los tableros del piso 3 con una Potencia de: 6 kVA

T3: Representa los tableros del piso 4 al 12 con una Potencia de: 10 kVA

T4: Representa los tableros del piso 13 con una Potencia de: 11 kVA

Se busca comprobar además que la corriente de cortocircuito no depende de la potencia demandada por la carga.

Se procede a realizar un estudio de falla trifásica de corto circuito. Los cálculos de falla se realizan aplicando ambas normas. Para estos cálculos se usó de diferentes softwares comercial que, entre otras características, tiene una herramienta para el cálculo de corrientes de cortocircuito.

Se decide hacer el cálculo de corrientes de cortocircuito en dos paquetes digitales propios de fabricantes de protecciones eléctricas, con el fin de comparar los resultados con los software escogidos inicialmente para este proyecto que son de uso genérico.

Software propio de fabricantes de protecciones eléctricas

- LSPS de LG
- Melshort de Mitsubishi Electric

Estos software realiza el cálculo de corrientes de cortocircuito en base a el estándar IEC 60909

Software escogidos inicialmente para el caso de estudio:

- ETAP
- Digsilet Power Factory

Estos software a diferencia de los anteriores permites realiza el cálculo de corrientes de cortocircuito en base a los estándar IEC 60909 y ANSI/IEEE 141

Nota: los resultados de las simulaciones en los diferentes Software para cálculo de corrientes de cortocircuito se presentan en el numeral 7.10 RESULTADOS.

7.6 SIMULACIÓN REALIZADA EN LSPS DE LG

Cálculo de corriente de cortocircuito utilizando el software LSPS

El primer paso es dibujar el diagrama unifilar simplificado. Para esto, es necesario que este habilitado el icono Drawing de la barra de herramientas.

- Barra de herramientas.



Figura 7-3 Barra de herramientas LSPS.

- Icono Drawing



Figura 7-4 Icono Drawing- LSPS

Con esto se habilita la barra de herramientas Control Manager, la cual contiene todos los elementos disponibles por el software para la implementación del diagrama unifilar simplificado.

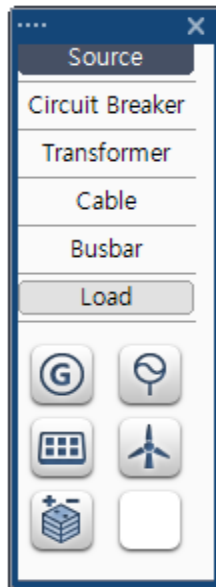









Figura 7-5 la barra de herramientas Control Manager –LSPS

En la tabla 7-5 se explican los elementos comúnmente usados para instalaciones eléctricas de baja tensión.

Tabla 7-6 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN EN LSPS

Elemento	Descripción
	Utility Buses Permite modelar la red equivalente de distribución. Es necesario configurar el nivel de tensión, capacidad (MVA), la relación X/R.
	Busbar Representa las barras del sistema , Es necesario indicar la tensión de operación
	3-Phase Transformer Para los transformadores es necesario configurar la capacidad (kVA), niveles de tensión, conexión, impedancia en % y la relación X/R
	3-Phase Cables Permite modelar los cables. Es necesario configurar la longitud, impedancias de secuencia positiva y secuencia cero, capacidad térmica del cable.
	Load Representan las cargas. Es necesario configurar la capacidad (kW), Factor de potencia y tipo de carga.
	Motor Permite modelar motores. Es necesario configurar la capacidad (kW), impedancia en %.
	Circuit-Breaker Para los breaker es necesario configurar el tipo de protección, corriente nominal, numero de polos.

Para modificar los parámetros y variables en cada elemento, basta con dar doble clic sobre el elemento que se desea editar como se muestra en la siguiente figura.

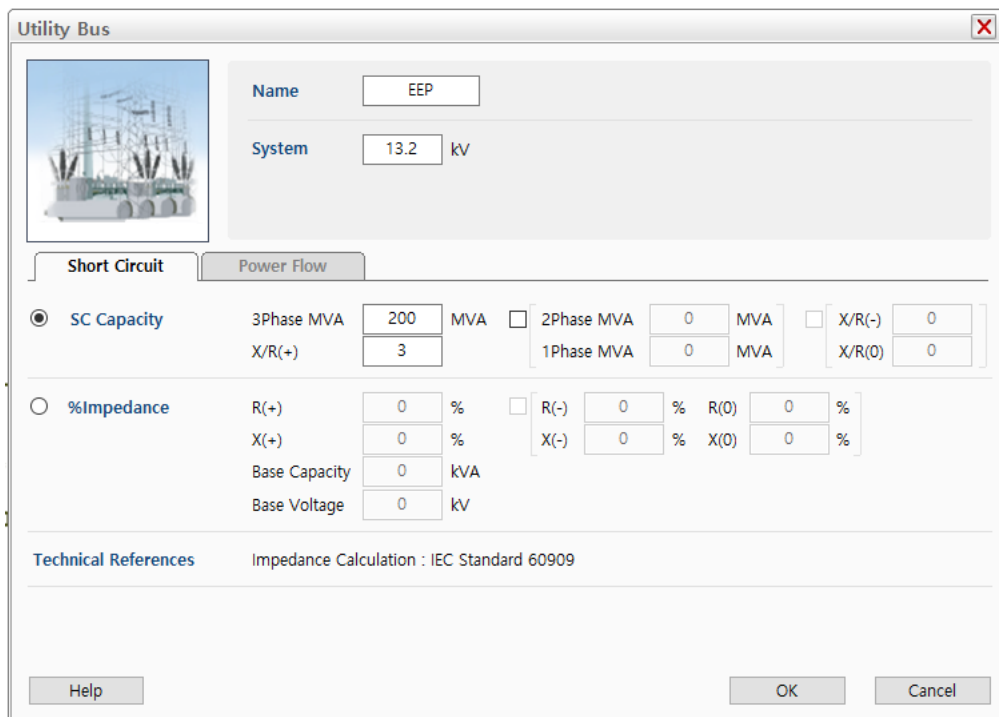


Figura 7-6 Ventana de edición. Red equivalente al sistema de distribución. – LSPS

El segundo paso es habilitar el icono SC Calculation de la barra de herramientas.



Figura 7-7 Icono SC Calculation. LSPS

Al habilitar este icono el programa realiza el cálculo de corrientes de cortocircuito, mostrando los valores a cada lado de las protecciones y cargas del diagrama unifilar.

El tercer paso es habilitar el icono CB Auto Selection de la barra de herramientas.




Figura 7-8 el icono CB Auto Selection. LSPS

Al habilitar este icono el programa realiza una selección automática de protecciones de la marca propia de acuerdo a los parámetros ingresados por el usuario, además de habilitar una librería que se puede observar al hacer doble click sobre cada protección en una pestaña llamada **CB Selection** y según el criterio del diseñador se puede cambiar la referencia seleccionada por el programa por otra con diferentes características, como se observa en la figura 7-9.

LS de LG puede ofrecer las siguientes opciones.

- Interruptores de la línea económica hasta 1200Amperios fijos, familia METASOL
- Interruptores regulables hasta 1600Amperios, familia SUSOL
- Interruptores en Aire regulables hasta 6300Amperios, Familias SUSOL y METASOL
- Minibreakers y Protección diferencial

Low Voltage Circuit Breaker



Name CB-100

Protection Line

Status Close Open

CB Setting

Type MCB Icu Ics

Frame/phase ϕ Dist. Total

Rated Amps 30 A Margin(%) 100 % 1.699 kA

SC Current 1.699 kA

Voltage 0.208 kV

Phases/Poles 3Phase 2

CB Selection **Coordination CB**

No.	CB Name	AF	In_max	Select	Icu	Ics	Tem...	Inmax(temperature)
1	BF5230A	60	30	Select	2.5	2.5e-...	40	30
2	BF5240A	60	40		2.5	2.5e-...	40	40
3	BF5250A	60	50		2.5	2.5e-...	40	50
4	BKN2PD32A	63	32		6	6e-0...	40	32
5	BKN2PC32A	63	32		6	6e-0...	40	32
6	BKN2PB32A	63	32		6	6e-0...	40	32
7	BKN-b2PC32A	63	32		10	1e-0...	40	32
8	BKN-b2PB32A	63	32		10	1e-0...	40	32

Technical References DB Data T-C Curve Short-circuit current is calculated based on IEC60909

Figura 7-9 Ventana de edición de Protecciones. – LSPS.

Para Observar las gráficas TC (Tiempo Corriente) de cada protección basta con hacer clic derecho sobre la protección deseada y clip en la opción TC- Curve del menú que se despliega (ver figura 7-10), en este momento se abre otra Pestaña del software donde presenta la característica TC de la protección como se observa en la figura 7-11

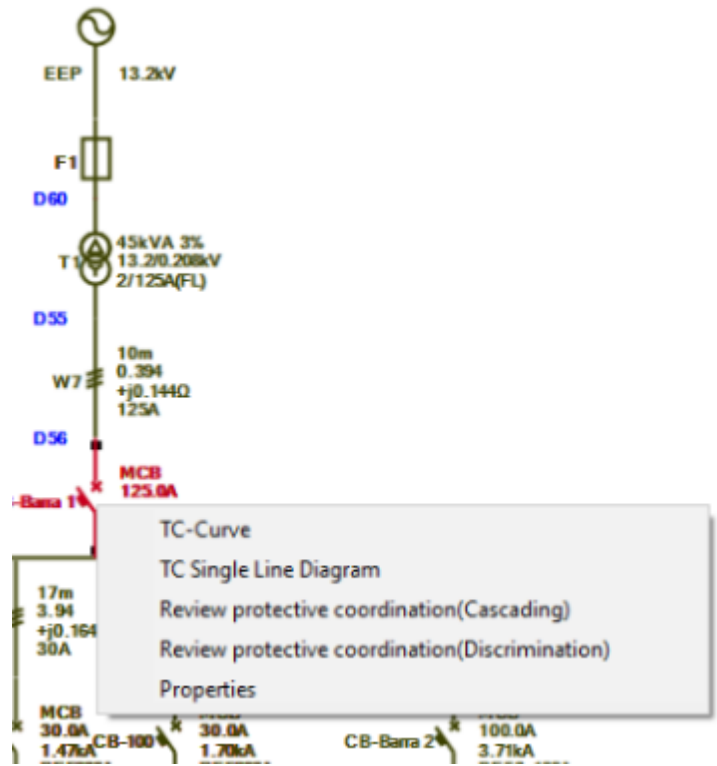


Figura 7-10 Opción TC- Curve – LSPS

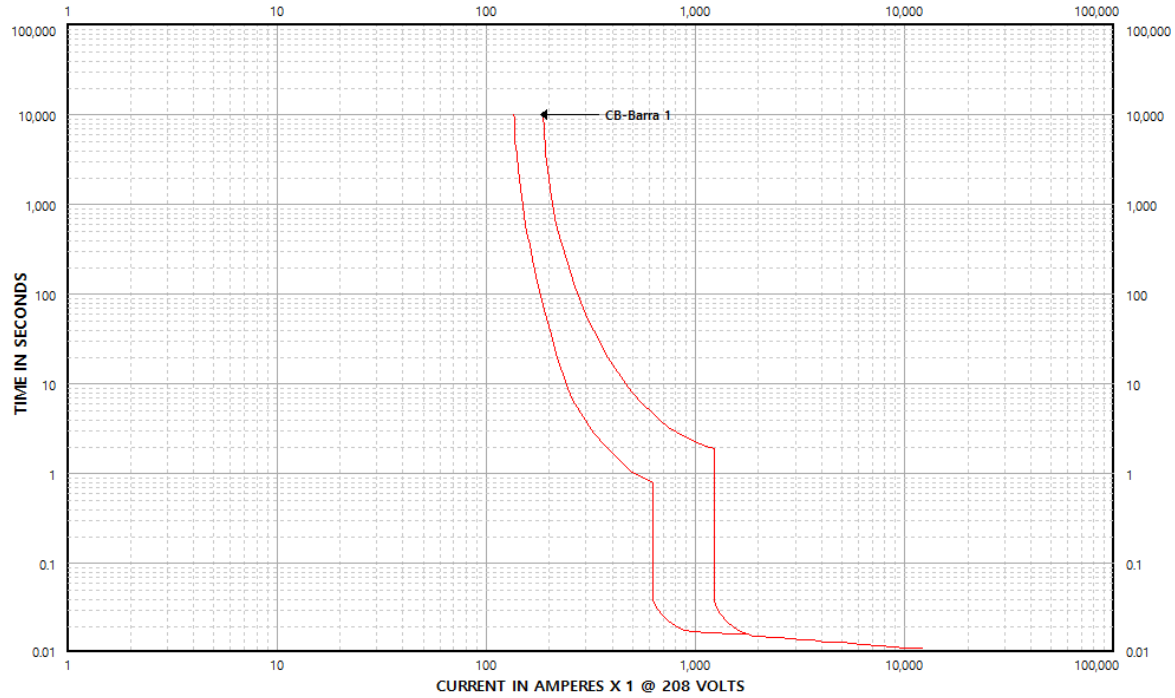


Figura 7-11 Curvas tiempo corriente – LSPS

Si se desea realizar una coordinación de protecciones solo es necesario seleccionando las protecciones que se desean coordinar y haciendo click derecho se despliega el menú con la opción Add TC- Curve.

- Para seleccionar varias protecciones se hace uso de la tecla shift.

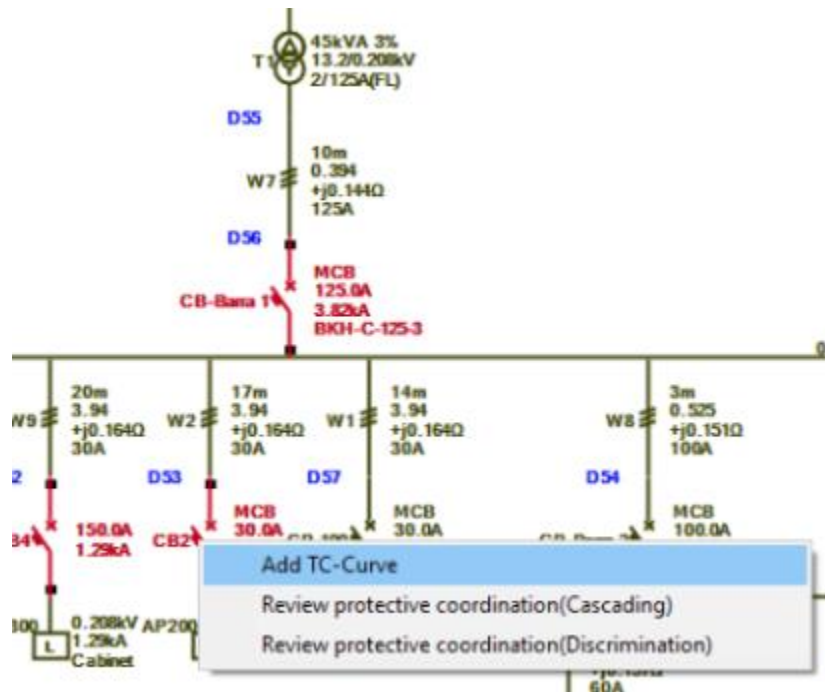


Figura 7-12 Opción de coordinación de protecciones – LSPS

A continuación se presentan los diagramas unifilares implementados para los casos 1 y 2, como también el estudio de coordinación de protecciones donde se evidencia de forma gráfica el comportamiento termo magnético de las curvas asociadas a los diferentes tipos de Interruptores.

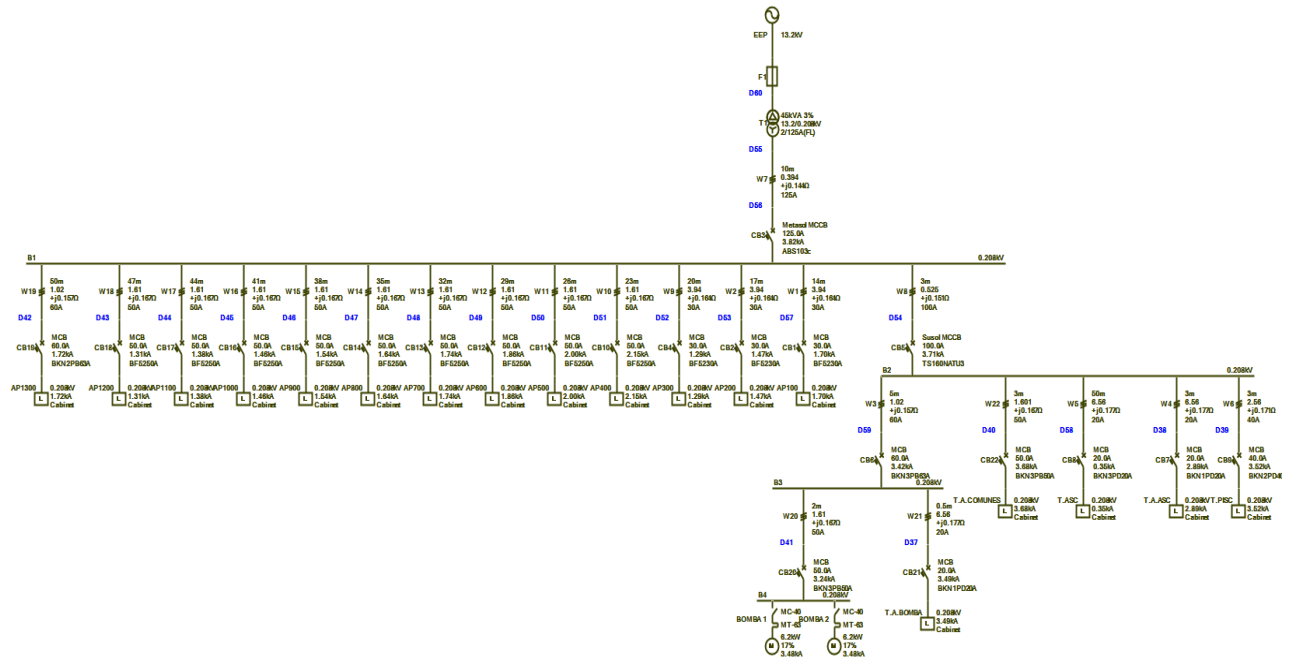


Figura 7-13 Diagrama unifilar caso 1 – LSPS

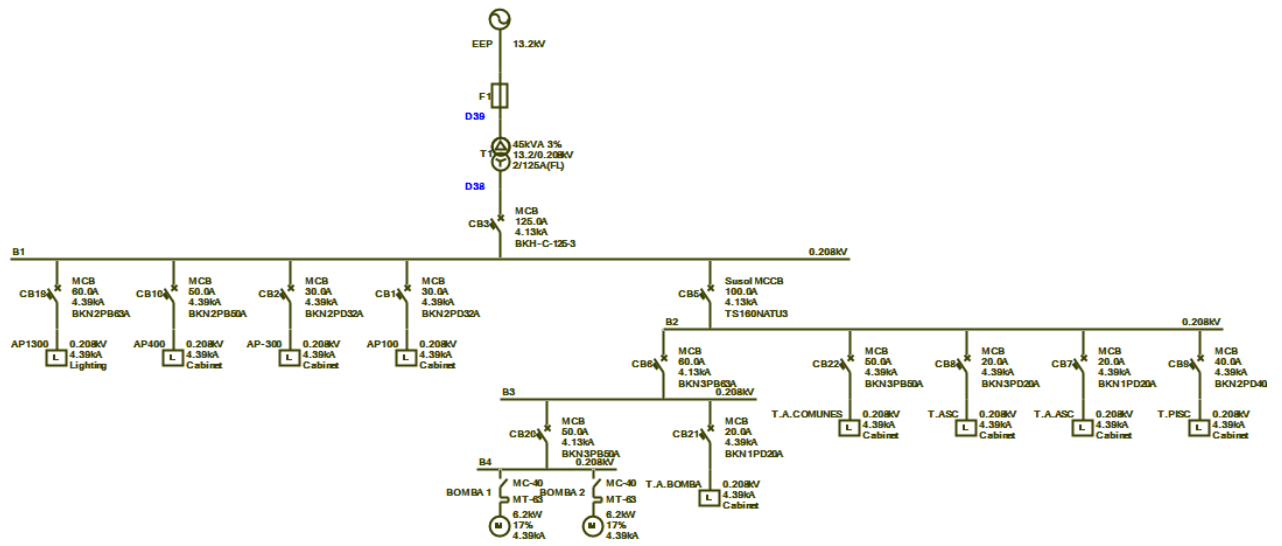


Figura 7-14 Diagrama unifilar caso 2 – LSPS

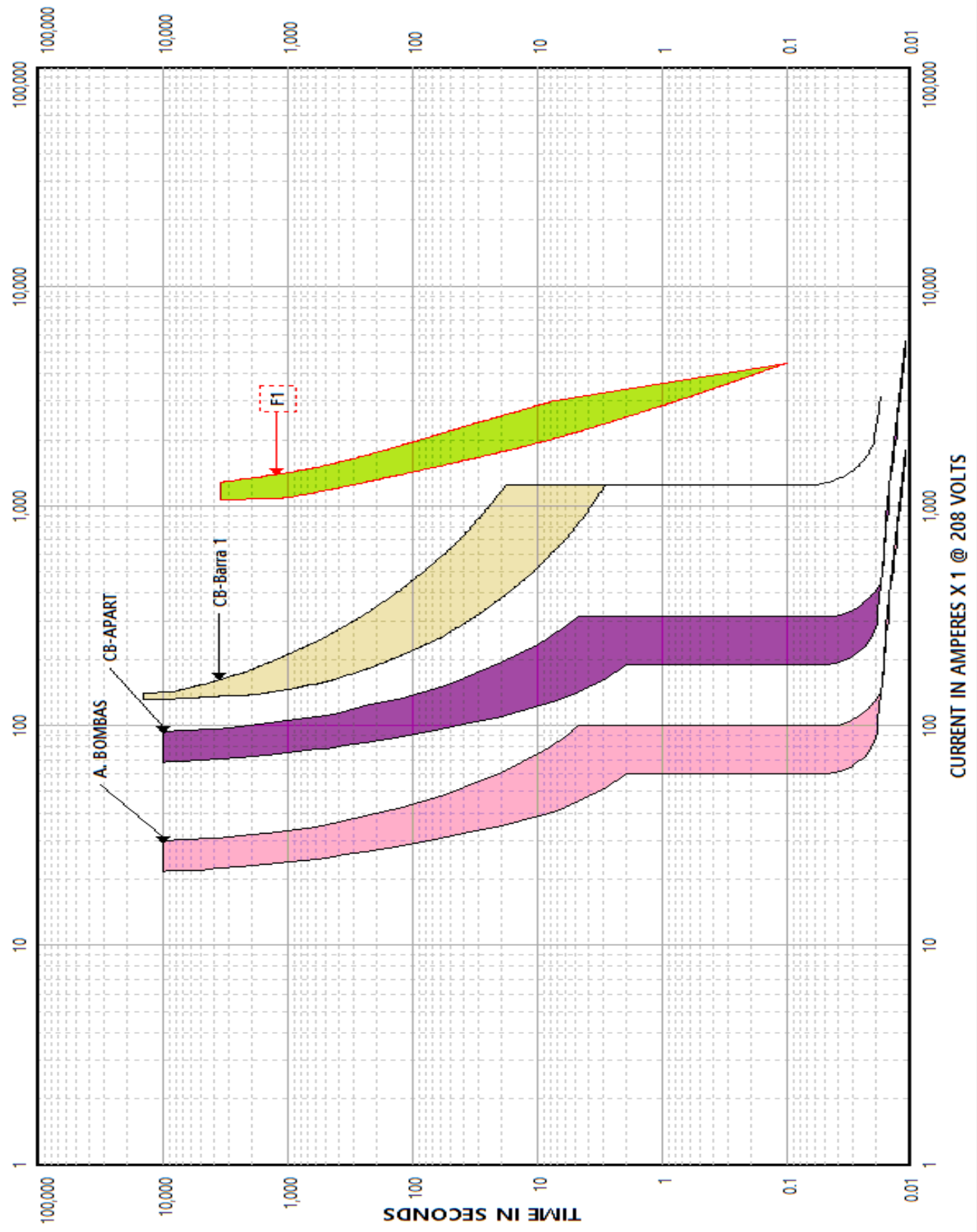


Figura 7-15 Coordinación de protecciones – LSPS

7.7 SIMULACIÓN REALIZADA EN MELSHORT DE MITSUBISHI ELECRIC

Cálculo de corriente de cortocircuito utilizando el software MELSHORT

En este software inicialmente se debe verificar en la barra de herramientas, en la pestaña Skeleton que se encuentren activadas las barras Element bar y Co-ordination bar como se observa en la figura 7-16, luego se da clic sobre la opción Setup this skeleton... la cual habilita el cuadro de dialogo mostrado en la figura 7-17 donde se procede a configurar la frecuencia del sistema, Capacidad que se desea tomar como referencia y el espacio de trabajo.

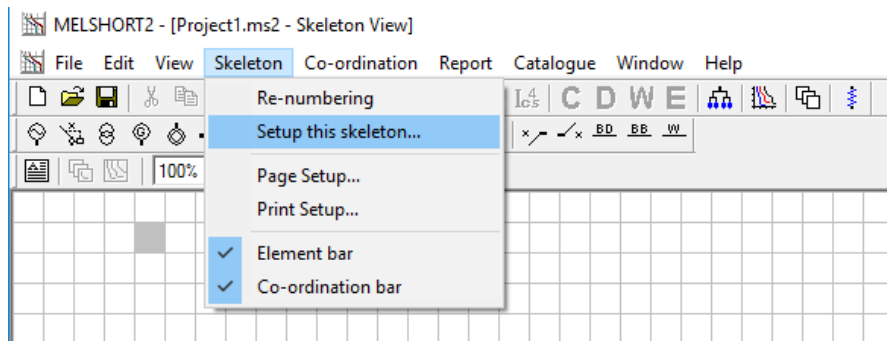


Figura 7-16 Configuración de frecuencia des sistema y espacio de trabajo paso 1 - Melshort

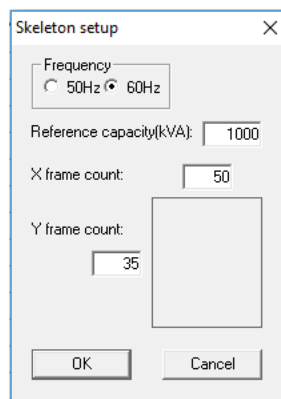


Figura 7-17 Configuración de frecuencia des sistema y espacio de trabajo paso 2 – Melshort

El primer paso es dibujar el diagrama unifilar simplificado. Para esto, es necesario que este habilitado la opción Drawing de la barra de herramientas.

Con esto se habilitan las barras de herramientas Element bar y Co-ordination bar, la cual contiene todos los elementos disponibles por el software para la implementación del diagrama unifilar simplificado.

1

Figura 7-18 Opción Drawing – Melshort



Figura 7-19 Barras de herramientas Element bar – Melshort

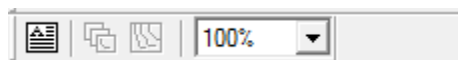










Figura 7-20 Barras de herramientas Co- coordination bar – Melshort

En la tabla 7-6 se explican los elementos comúnmente usados para instalaciones eléctricas de baja tensión.

Tabla 7-7 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN MELSHORT

Elemento	Descripción
	Source Permite modelar la red de distribución en baja tensión. Es necesario configurar el nivel de tensión (V), capacidad (MVA), la relación X/R, frecuencia.
	Zero conductor Representa las barras del sistema, es necesario configurar la tensión de operación.
	Transformer Para los transformadores es necesario configurar sus niveles de tensión (V), la conexión, capacidad (kVA), Impedancia (%), relación X/R.
	Wire Permite modelar los cables. Es necesario configurar el material, longitud, temperatura ambiente, corriente de la carga alimentada, y las impedancias de secuencia positiva.
	General Load Permite modelar el tipo de carga, es necesario configuras la corriente de carga, factor de potencia
	Low 85mpleme Circuit-Breaker Esta opción permite modelar las protecciones en baja tensión, es necesario configurar la corriente nominal, el número de polos el tiempo de accionamiento y la referencia según la marca del fabricante.
	Motor Esta opción permite modelar los motores, es necesario configurar la capacidad (kV), Factor de potencia.
	High 85mpleme Circuit-Breaker Esta opción permite modelar las protecciones en altas tensiones, por medio de este se pueden modelar los fusibles del lado primario del transformador.

El segundo paso consiste en habilitar la opción Check skeleton de la barra de herramientas principal, con esta opción el programa procede a revisar el diagrama implementado, y

habilita un cuadro de dialogo que indica si las conexiones son correctas para proceder al siguiente paso o si no muestra los problemas a solucionar.

2

Figura 7-21 Opción Check skleton- Melshort.

EL tercer pasó el habilitar la opción calculation, con la cual el programa procede a realizar el cálculo de las corrientes de cortocircuito. Al seleccionar esta opción el programa realiza el cálculo de corrientes de cortocircuito, mostrando los valores a cada lado de las protecciones en el diagrama unifilar.

3

Figura 7-22 Opción calculation – Melshort.

Seguidamente se procede a seleccionar la opción Automatic selection by Icu, seguida de Automatic selection by Ics. Al seleccionar estas opciones el programa realiza una selección automática de protecciones de la marca propia de acuerdo a los parámetros ingresados por el usuario, además de habilitar una librería que se puede observar al hacer doble click sobre cada protección en una pestaña llamada **Type of breakers** y según el criterio del diseñador se puede cambiar la referencia seleccionada por el programa por otra con diferentes características, como se observa en la figura 7-9.

Low-voltage circuit breaker [X]

Voltage(V): 208 Reference No.: CB-100

Rated current(A): 30 Poles: 2 Calculation point
 OFF

Manufacturer: Mitsubishi electric Draw GFR

Kind: MCB Clear

Type: BH-S M6 Type B 2Poles Detail... GFR...

Ics(kA): 6.000 I''k3direct(kA): 1.6783

Icu or Icn(kA): 6.000 Disconnecting time against electric shock(s): 0.40

Selected by Ics:

Type of breakers	Remarks	Ics	Icu or Icn
[MCB]			
BH-S M3 Type B 2Poles		3.000	3.00
BH-S M6 Type B 2Poles	Chosen	6.000	6.00
BH-S M3 Type C 2Poles		3.000	3.00
BH-S M6 Type C 2Poles		6.000	6.00
BH-S M3 Type D 2Poles		3.000	3.00

Figura 7-23 Ventana de edición de Protecciones. – LSPS.

Para realizar la coordinación de protecciones basta con dar clic derecho sobre una de las protecciones y escoger la opción Create a co-ordination, con esto se habilita una nueva ventana donde se observa la curva Tiempo Corriente de la protección como se observa en la figura 7-24; se continúan agregando las protecciones que se desean coordinar haciendo clic sobre cada una de ellas y seleccionando la opción Add co-ordination.

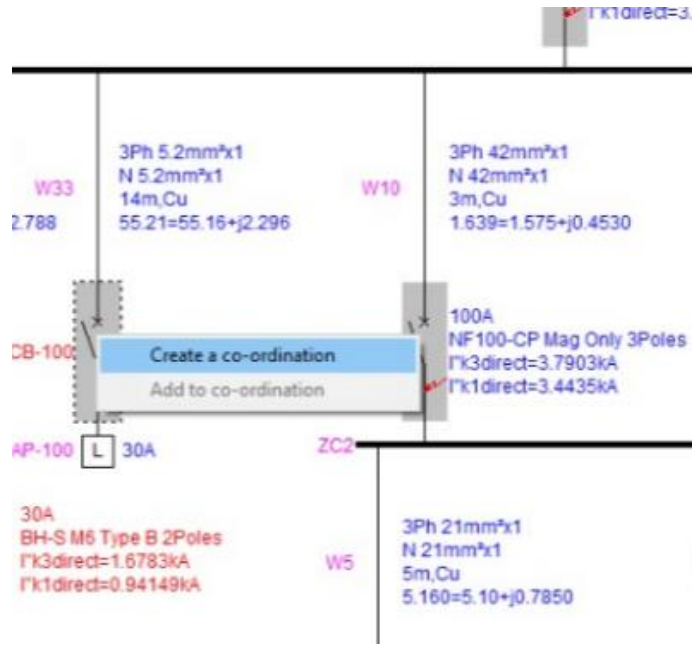


Figura 7-24 Opción créate a co-ordination

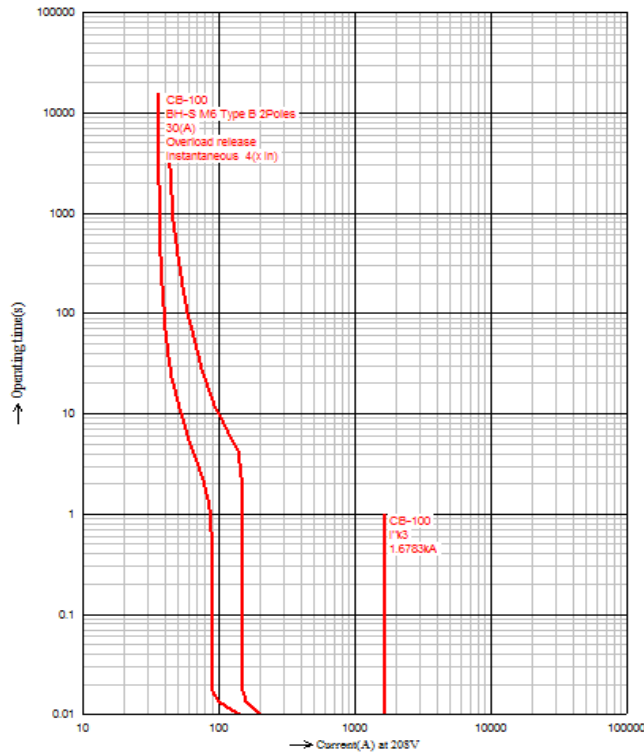


Figura 7-25 Curva tiempo corriente – Melshort

A continuación se presentan los diagramas unifilares implementados para los casos 1 y 2, como también el estudio de coordinación de protecciones donde se evidencia de forma

gráfica el comportamiento termo magnético de las curvas asociadas a los diferentes tipos de Interruptores.

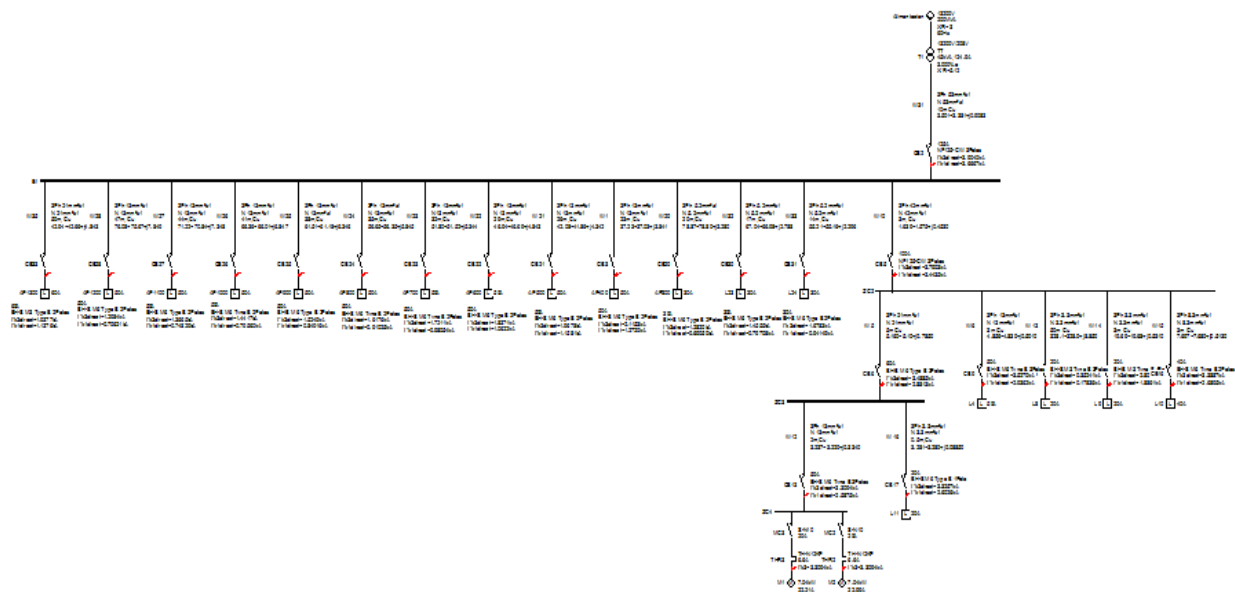


Figura 7-26 Diagrama unifilar caso 1 – Melshort

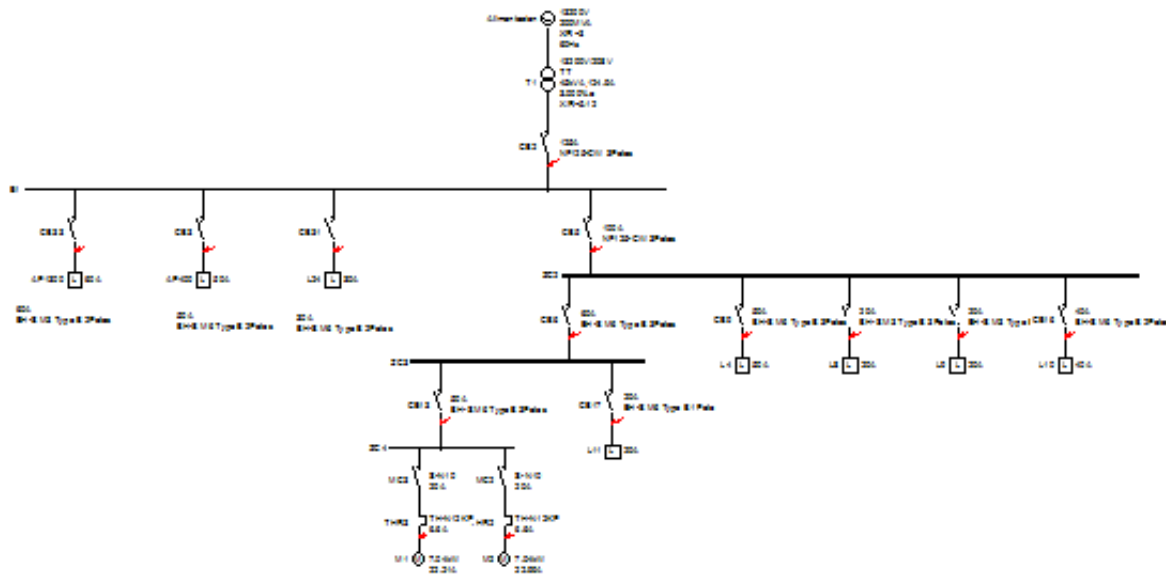


Figura 7-27 Diagrama unifilar caso 2 – Melshort

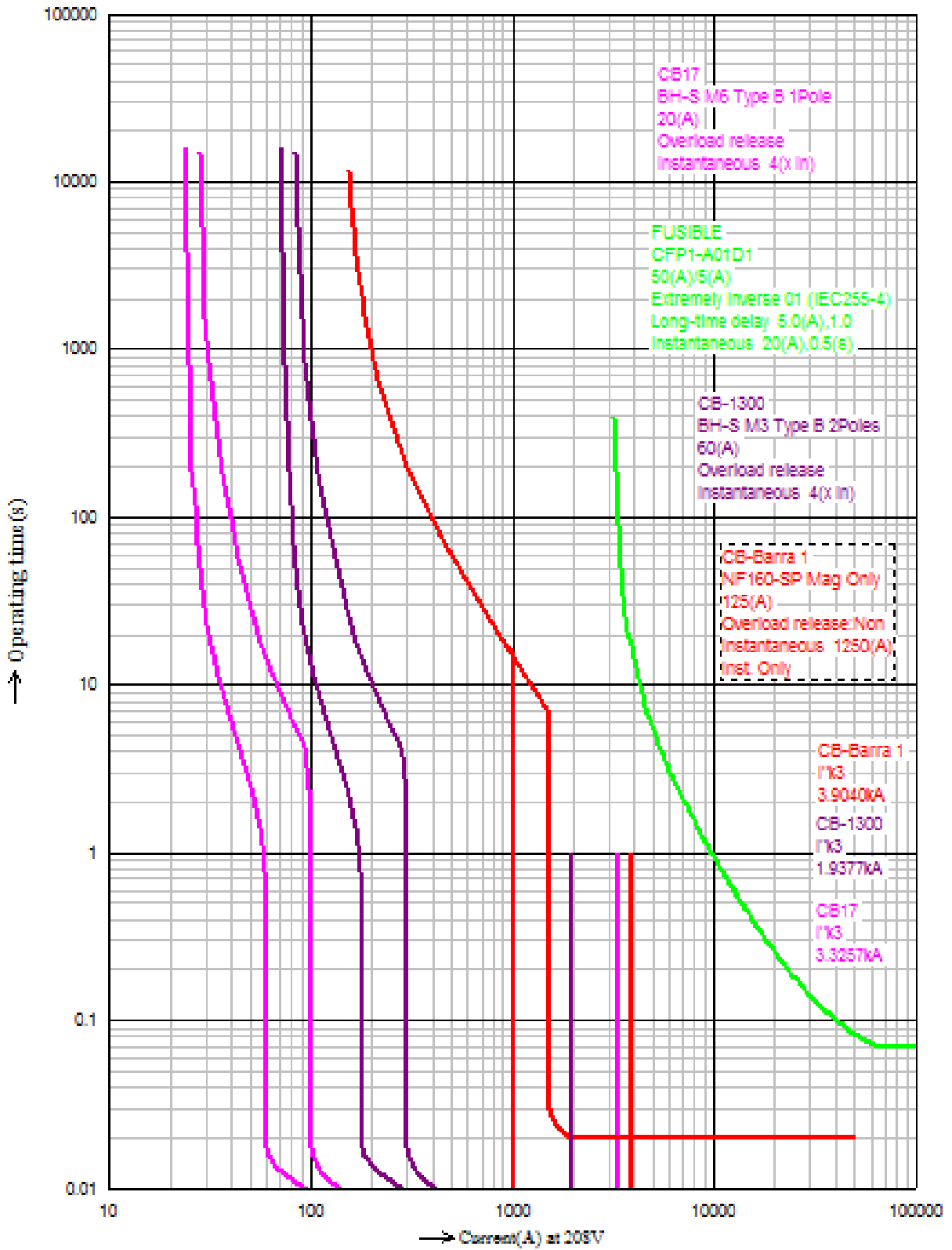


Figura 7-28 Coordinación de protecciones – Melshort

7.8 SIMULACIÓN REALIZADA EN ETAP

Cálculo de corriente de cortocircuito utilizando el software ETAP

El primer paso es dibujar el diagrama unifilar simplificado. Para esto, es necesario que este habilitado el icono **Edit** de la barra de herramientas, con esta se activa una barra que contiene todos los elementos disponibles por el programa para la implementación de sistemas eléctricos, solo basta con dar clip en cada elemento que se desea agregar y ubicar la posición que se desea que este ocupe en el espacio de trabajo.



Figura 7-29 Barra de herramientas – Etap

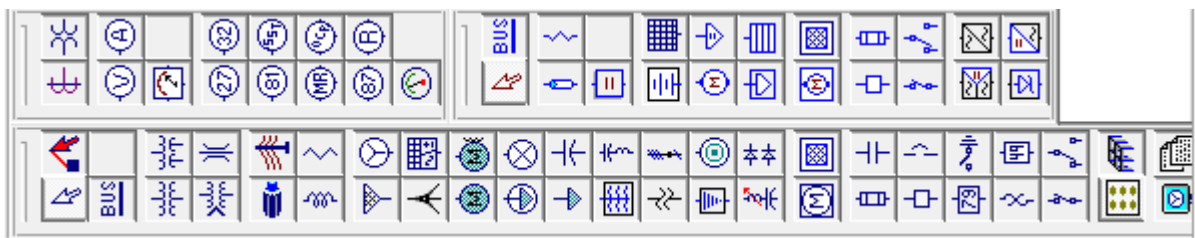









Figura 7-30 Barra de elementos eléctricos – ETAP

Cabe resaltar que al hacer clip en cada elemento se abre una ventana de edición, donde se pueden modificar todos los parámetros de los elementos además se debe escoger la norma ANSI o IEC, con la que se desea implementar los cálculos posteriormente.

En la tabla 7-7 se explican los elementos comúnmente usados para instalaciones eléctricas de baja tensión

Tabla 7-8 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN ETAP

Elemento	Descripción
	Power Grip Permite modelar la red de distribución en baja tensión. Es necesario especificar el tipo de conexión monofásica o trifásica, la tensión nominal (kV), las impedancias de secuencia (%)
	Representa las barras del sistema, es necesario indicar la tensión de operación
	2-Winding Transformer Para los transformadores es necesario configurar sus niveles de tensión (kV), capacidad (kVA), la conexión, las impedancias de secuencia y la relación X/R
	Cable Permite modelar los cables, es necesario escoger la longitud y temperatura de operación los demás parámetros para cables se escogen según la librería de ETAP, en base al calibre, material y la norma que le aplique.
	Static Load Para las cargas es necesario configurar la tensión nominal, tipo de conexión.
	Motor Permite modelar los motores, es necesario configurar la capacidad (kV), conexión, valores de impedancia.
	Circuit-Breaker Para los breaker el programa habilita una librería donde se debe escoger la marca, el tipo de aplicación según los niveles de corriente, en base a estos datos presenta las protecciones que más se ajustan y el diseñador debe hacer la escogencia según su criterio.

El segundo paso consiste en habilitar la opción short – Circuit Analysis de la barra de herramientas, con la cual se habilita una barra que permite escoger las diferentes opciones para los cálculos de corrientes de cortocircuito como, tipo de norma, tipo de cortocircuito, graficas de las componentes DC del corto, como también un informe detallado del sistema y resultados de los cálculos.

Después de haber seleccionado las opciones necesarias según el caso que deseemos analizar el programa muestra en pantalla los resultados de corrientes de cortocircuito en buses y protecciones.



Figura 7-31 Barra de herramientas de cortocircuito –ETAP.

Si se desea realizar la coordinación de protecciones en este software se debe habilitar la opción Star- Protective Device Coordination. Con la cual se habilita una barra de herramientas con las diferentes opciones para la coordinación de dispositivos de protección eléctrica, también se habilita una pequeña barra de herramientas para modificar los diferentes casos de estudio.



Figura 7-32 Barra de herramientas de coordinación de protecciones – ETAP.

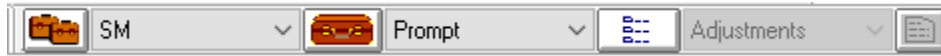


Figura 7-33 Barra de herramientas para caso de estudio.

Haciendo clic en el primer icono de la barra 7-34 se crea un caso de estudio que seguidamente se para a modificar haciendo clic en el segundo icono de esta misma barra, este despliega una ventana donde se pueden escoger los puntos del sistema donde se desea hacer el cálculo de corrientes de cortocircuito y la norma bajo la cual estos cálculos se implementaran.

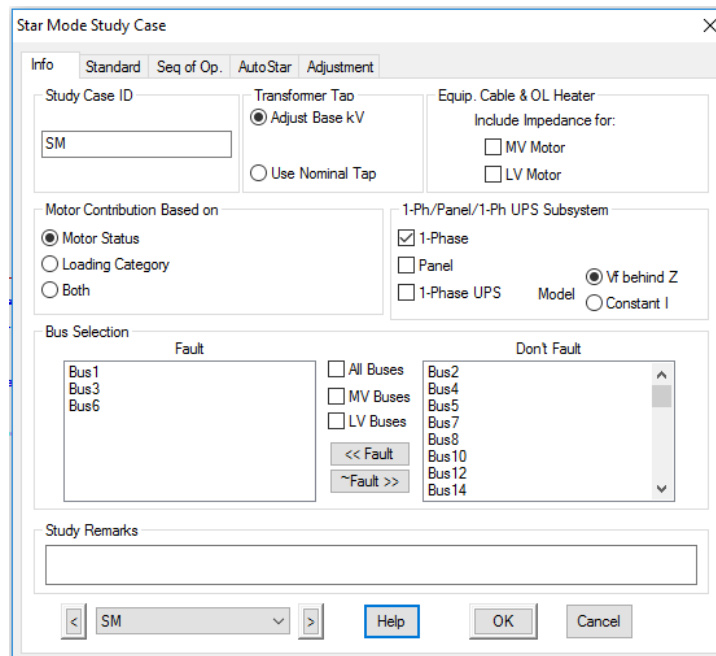


Figura 7-34 Ventana de edición de caso de estudio - ETAP

Después de seguir el procedimiento anterior basta entonces con seleccionar el diagrama unifilar completo o las protecciones que se desean coordinar y hacer clic en el primer icono que se muestra en la figura 7-32 llamado Created star view la cual despliega una pestaña donde presenta las curvas tiempo corriente de los dispositivos seleccionados.

A continuación se presentan los diagramas unilaterales implementados para los casos 1 y 2, como también el estudio de coordinación de protecciones donde se evidencia de forma gráfica el comportamiento termo magnético de las curvas asociadas a los diferentes tipos de Interruptores.

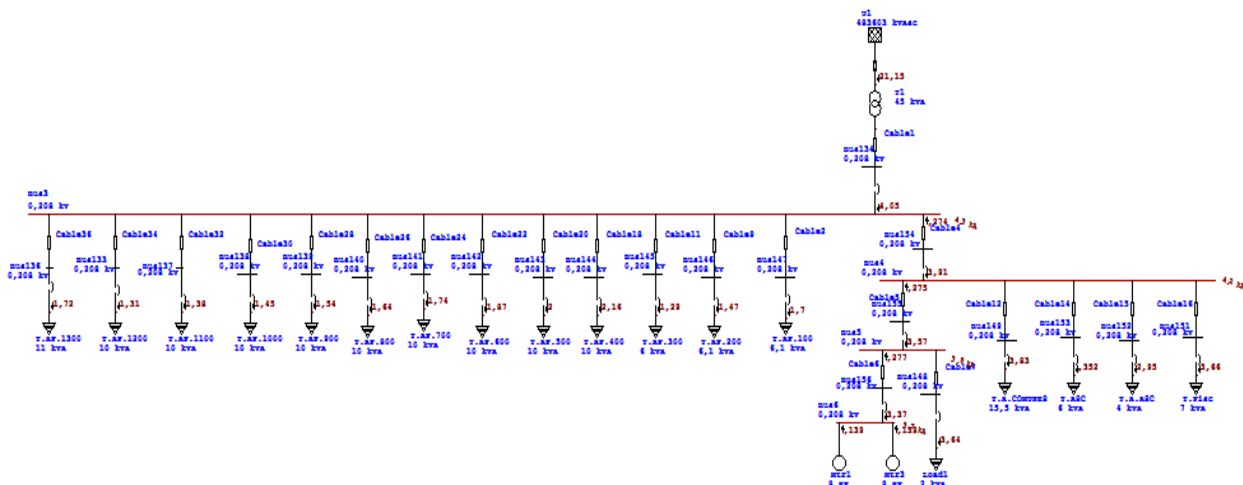


Figura 7-35 Diagrama unifilar caso 1 – ETAP

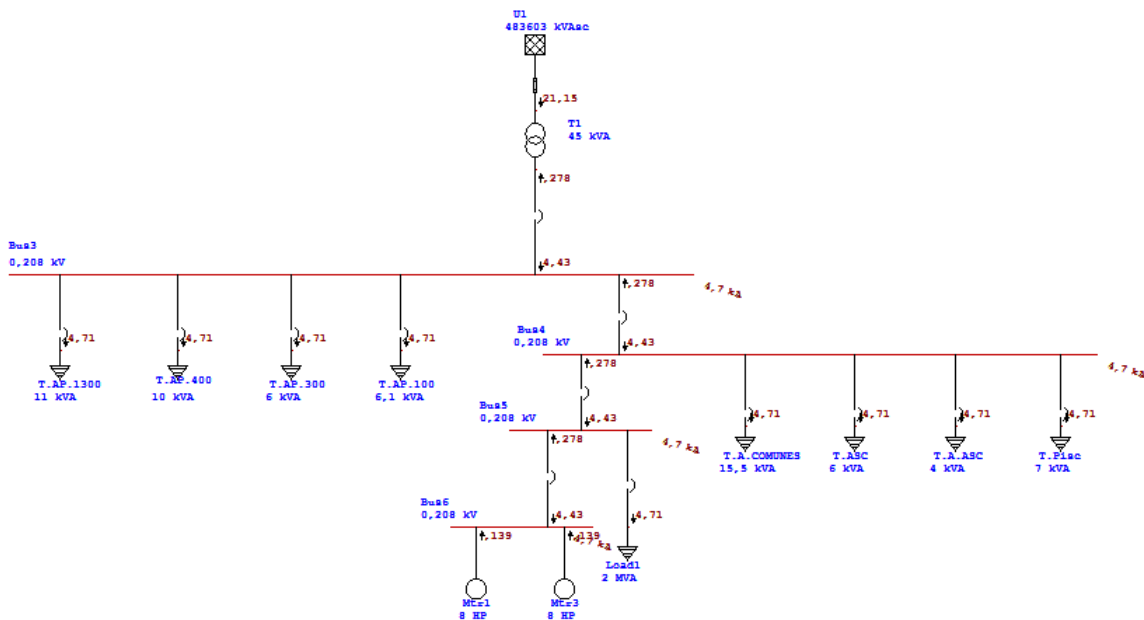


Figura 7-36 Diagrama unifilar caso 2 – ETAP

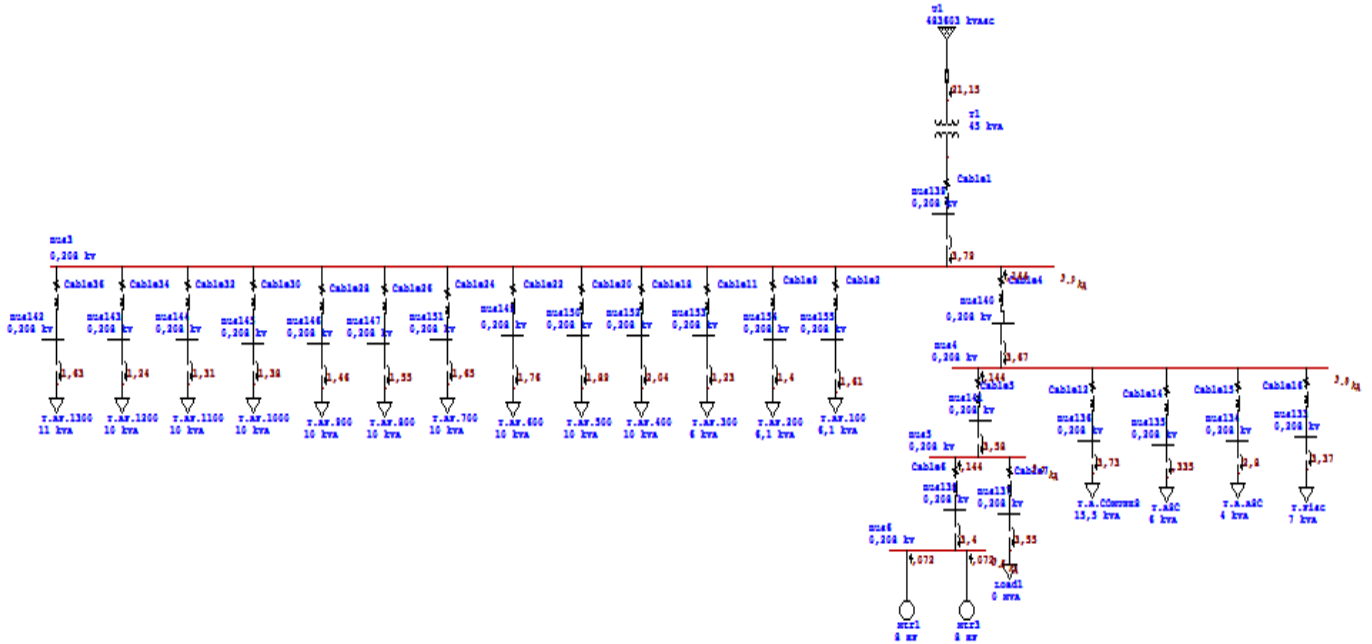


Figura 7-37 Diagrama unifilar caso 3 – ETAP

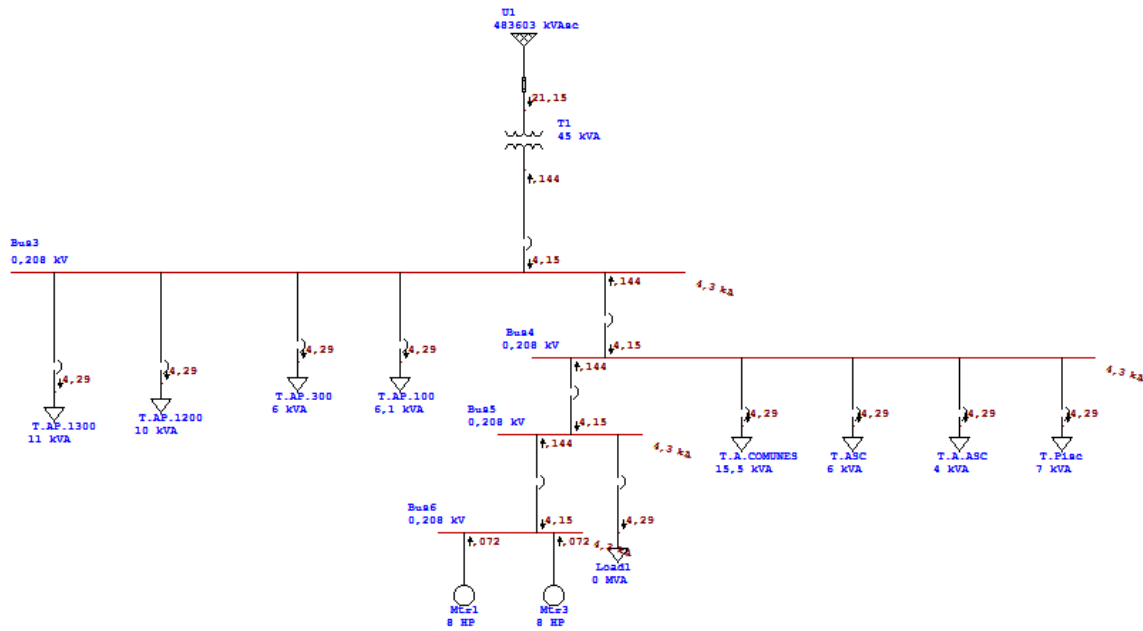


Figura 7-38 Diagrama unifilar caso 4 – ETAP

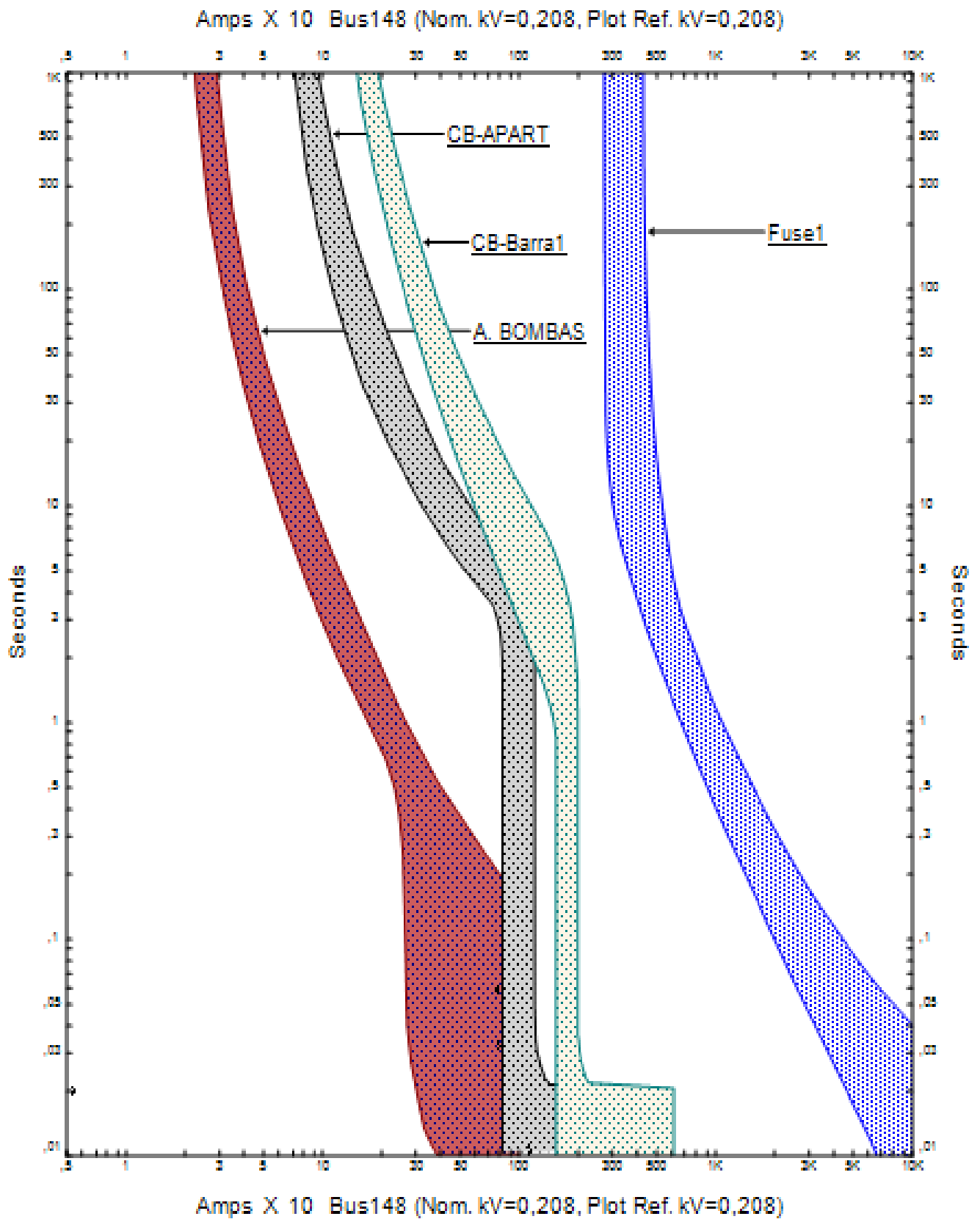


Figura 7-39 Coordinación de protecciones – ETAP.

7.9 SIMULACIÓN REALIZADA EN DIGSILEN

Cálculo de corriente de cortocircuito utilizando el software Digsilent

El primer paso consiste en dibujar el diagrama unifilar simplificado. Para esto, se utiliza la barra de herramientas mostrada en la figura 7-29 de la cual se pueden arrastrar los elementos necesarios para construir el unifilar.

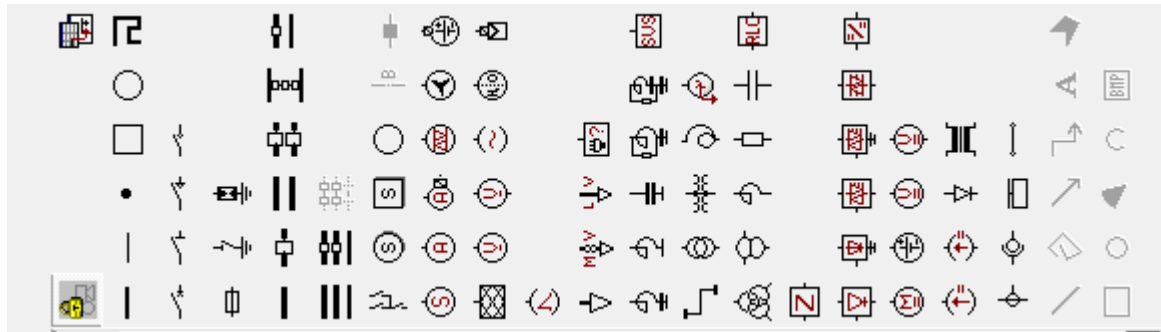









Figura 7-40 Barra de herramientas Digsilent (Ubicada a la derecha)

En la tabla 7-8 se explican los elementos comúnmente usados para instalaciones eléctricas de baja tensión

Tabla 7-9 ELEMENTOS PARA DISEÑAR UN DIAGRAMA UNIFILAR EN DIGSILENT.

Elemento	Descripción
	Busbar Representa las barras del sistema , dentro de su configuración es necesario indicar la tensión de operación
	Winding Transformer Para los trasformadores en necesario configurar sus niveles de tensión, la conexión y frecuencia de operación y la relación X/R
	Synchronous Machine Permite obtener generadores y motores síncronos.
	Line Para las líneas es necesario configurar la distancia de los conductores y las impedancias de secuencia positiva y cero, así como la tensión y frecuencia de operación.
	General Load Para las cargas es necesario configurar la tensión de operación y las potencias aparente y reactiva.
	Circuit-Breaker Para los breaker es necesario configurar la corriente de operación, el tiempo de accionamiento y la resistencia interna.
	External Grid Esta opción permite agregar una red externa de alimentación

Para modificar los parámetros y variables en cada elemento, basta con dar doble clic sobre el elemento. A continuación se da un ejemplo configurando el transformador.

Cada valor ingresado es importante, por esta razón es vital que se tenga pleno conocimiento de todos los parámetros y características tanto físicas como técnicas que identifican un equipo, no importa si este es un transformador o bien un cable.

Dando doble clic sobre la figura aparece la ventana (figura 7-40) en la cual se pueden indicar el número de transformadores en paralelo y con el menú desplegable acceder a librerías generales o del proyecto, y en su defecto ingresar nuevos parámetros.

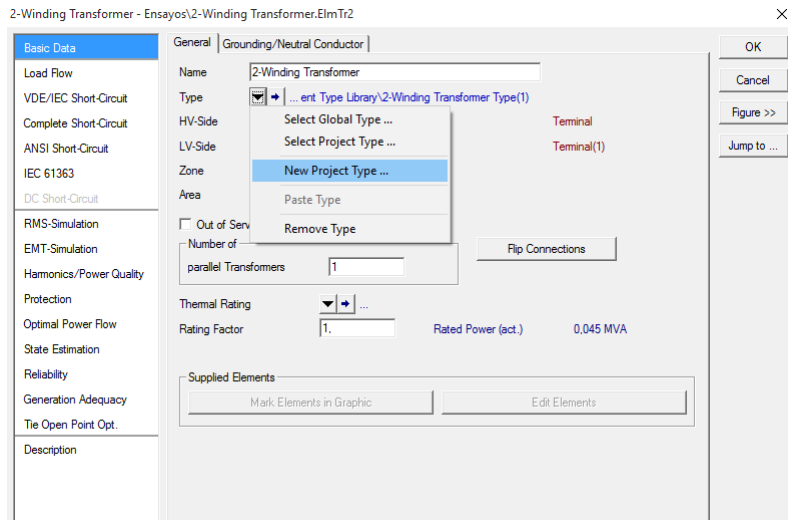


Figura 7-41 Ventana para la configuración de transformadores Digilent.

Cuando se ingresa un nuevo tipo de transformador utilizando la opción New Project Type aparece la ventana de la figura 7-31 donde se ingresan los valores de placa del transformador.

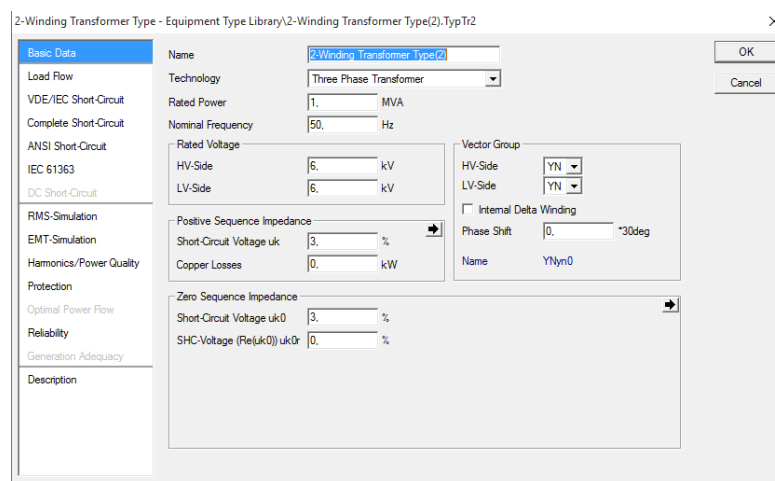


Figura 7-42 Ventana para la configuración de transformadores Digilent

En el paso 2 se emplea la barra de herramientas mostrada en la figura 7-32 para realizar la respectiva simulación de cortocircuito.

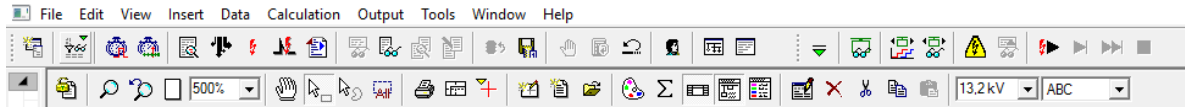


Figura 7-43 Barra de herramientas Digsilent parte superior

Utilizando el ícono Calculate Short-Circuit se accede a la ventana emergente que muestra el menú para configurar el tipo de falla. Como se muestra en la figura 7-43 esta ventana permite configurar el tipo de análisis de corto circuito que se desea realizar ya sea con norma ANSI ó IEC o las demás opciones; la opción Fault Type permite escoger el tipo de falla, la opción Calculate permite escoger entre calcular la corriente máxima o mínima de cortocircuito, la opción User selection permite escoger los puntos del circuito dentro del diagrama unifilar donde se quiere realizar la falla.

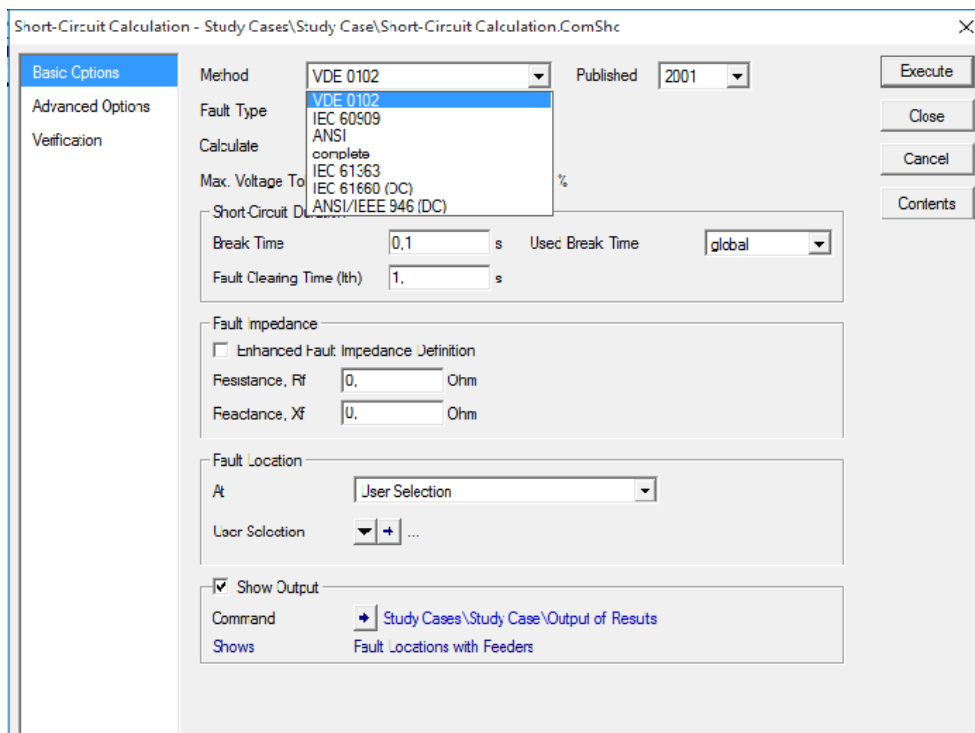


Figura 7-44 Ventana para la configuración de modo de falla de cortocircuito Digsilent

Una vez terminadas de ingresar todas las condiciones de estudio del cortocircuito, se ejecuta la simulación en pantalla aparecerán los respectivos valores de corriente de cortocircuito.

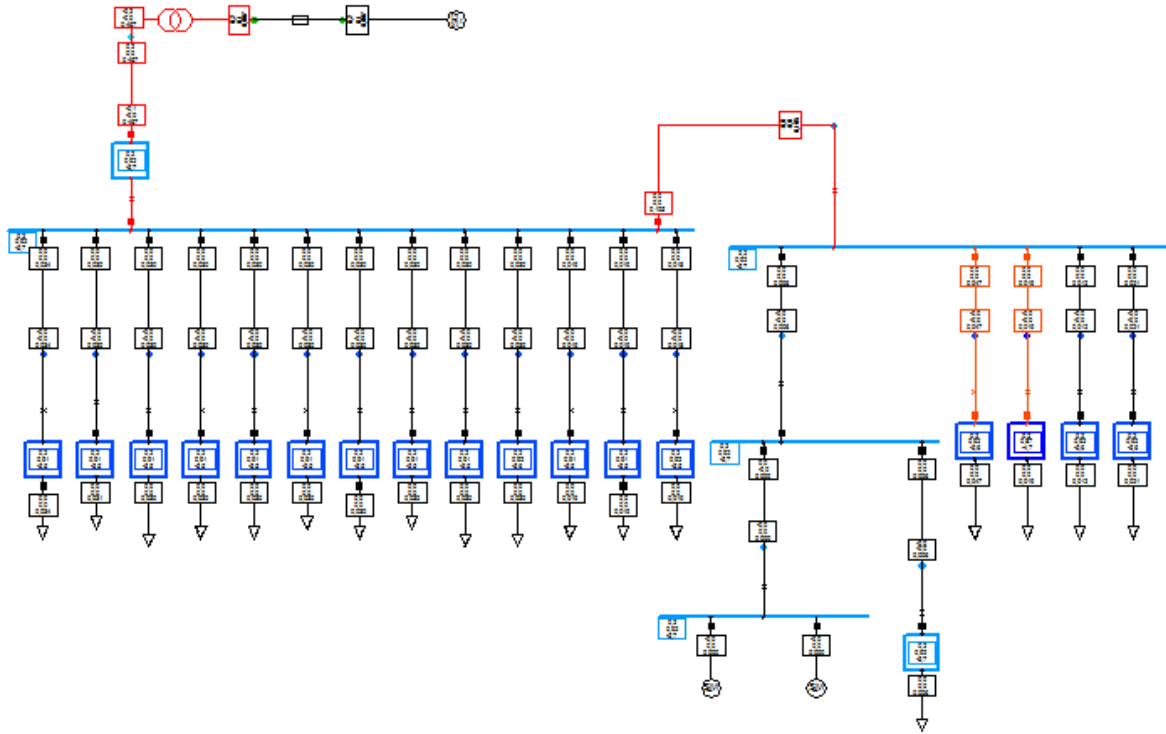


Figura 7-45 Diagrama unifilar caso 1 y 3 – Digsilent.

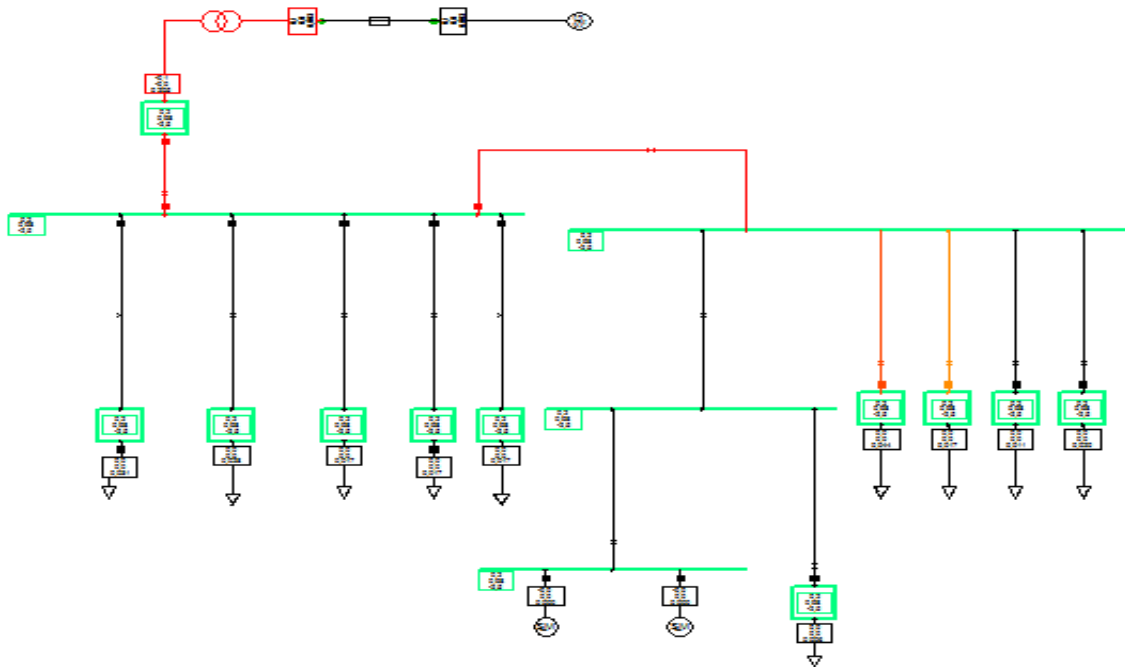


Figura 7-46 Diagrama unifilar caso 2 4 – Digsilent.

El software DigSilent es una herramienta de ingeniería que fue diseñada para la simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia, sus aplicativos están enfocados en la simulación de redes eléctricas pertenecientes a alta y media tensión, por tal razón, sus librerías y procedimientos están enfocados en facilitar las labores de cálculos y diseño en estos niveles.

Cuando se desea emplear dicho software para niveles de baja tensión (instalaciones de uso final), se requiere conocer en su totalidad y con certeza los parámetros de cada uno de los elementos pertenecientes al circuito que se desea simular, puesto que Digsilent no posee librerías para este nivel de tensión. Esto no impide que se puedan realizar análisis de cortocircuito con valores cercanos a los reales, sin embargo, para el caso de coordinación de protecciones Digsilent requiere la implementación de transformadores de corriente y relés para realizar la coordinación, los cuales en la práctica no son utilizados en baja tensión; por esta razón y por la complejidad que conlleva, se recomienda no realizar coordinación de protecciones en baja tensión empleando Digsilent, ya que este software se enfoca en alta y media tensión los resultados obtenidos no son de alta confiabilidad y en la mayoría de casos difíciles de obtener.

7.10 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de corrientes de cortocircuito implementando los casos 1, 2, 3 y 4 en los diferentes software de simulación. Estas simulaciones tuvieron como objetivo:

- Comparar los resultados de corriente de cortocircuito empleando la norma IEC 60909 y ANSI/IEEE 141.
- Comparar la utilidad, eficiencia y capacidad de las herramientas de simulación MELSH, LSPS, ETAP y DIGSILENT escogidas para el análisis de cortocircuito, comparando los resultados de corriente de cortocircuito obtenidos con cada una.
- Comparar la utilidad de implementar o no implementar en las simulaciones los conductores “cables” presentes en el sistema y el efecto que se genera de acuerdo a las longitudes de estos. Buscando sustentar porque para el análisis de cortocircuito en redes de baja tensión se acostumbra ignorar los efectos que están generan.

Tabla 7-10 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 1 con la norma IEC 60909

Con conductores – Estándar 60909				
Ubicación	Corriente de cortocircuito I [”] k [kA] MELSHORT	Corriente de cortocircuito I [”] k [kA] LSPS	Corriente de cortocircuito I [”] k [kA] ETAP	Corriente de cortocircuito I [”] k [kA] DIGSILENT
C-Barra 1	3.9	3.82	4.05	4.18
C-100	1.67	1.70	1.70	1.75
C-200	1.45	1.47	1.47	1.52
C-300	1.28	1.29	1.29	1.33
C-400	2.11	2.15	2.16	2.69
C-500	1.96	2.00	2.00	2.55
C-600	1.83	1.86	1.87	2.43
C-700	1.72	1.74	1.74	2.20
C-800	1.62	1.64	1.64	2.20
C-900	1.52	1.54	1.54	2.10
C-1000	1.44	1.46	1.45	2.00
C-1100	1.36	1.38	1.38	1.92
C-1200	1.29	1.31	1.31	1.84
C-1300	1.93	1.72	1.72	1.77
C-Barra 2	3.79	3.71	3.91	4.20
C-G.Bombas1	3.48	3.42	3.57	3.86
C-G.Bombas2	3.30	3.24	3.36	3.66
C-Bombas 1	3.30	3.48	3.36	3.66
C-Bombas 2	3.30	3.48	3.36	3.66
C-Alumbrado Bombas	3.32	3.49	3.62	3.67
C-Áreas comunes	3.52	3.68	3.82	3.98
C-Ascensor	0.35	0.35	0.35	0.37
C-A. Ascensor	2.80	2.89	2.94	3.03
C-Piscina	3.38	3.52	3.64	3.72

La tabla 7.9 presenta los resultados de las diferentes simulaciones del Caso 1 bajo la norma IEC 60909 empelando las cuatro herramientas de simulación.

Se observa la variación de la magnitud de la corriente de cortocircuito de acuerdo al punto en el que fue calculada y esto se debe a que al implementar los conductores en el sistema los valores de impedancia de estos y las longitudes establecidas generan una pequeña variación debida al aumento de la impedancia en el punto de falla. Se observa que la variación no es muy considerable ya que para este tipo de instalación eléctrica las longitudes que tienen estos conductores son pequeñas.

Tabla 7-11 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 2 con la norma IEC 60909

Caso 1- Estándar 60909				
Ubicación	Corriente de cortocircuito I^{''}k [kA] MELSHORT	Corriente de cortocircuito I^{''}k [kA] LSPS	Corriente de cortocircuito I^{''}k [kA] ETAP	Corriente de cortocircuito I^{''}k [kA] DIGSILENT
C-Barra 1	4,13	4,13	4,43	4.54
C-100	4,13	4,39	4,71	4.67
C-200	4,13	4,39	4,71	4.67
C-300	4,13	4,39	4,71	4.67
C-400	4,13	4,39	4,71	4.67
C-500	4,13	4,39	4,71	4.67
C-600	4,13	4,39	4,71	4.67
C-700	4,13	4,39	4,71	4.67
C-800	4,13	4,39	4,71	4.67
C-900	4,13	4,39	4,71	4.67
C-1000	4,13	4,39	4,71	4.67
C-1100	4,13	4,39	4,71	4.67
C-1200	4,13	4,39	4,71	4.67
C-1300	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Barra 2	4,13	4,13	4,43	4.67
C-G.Bombas1	4,13	4,13	4,43	4.67
C-G.Bombas2	4,13	4,13	4,43	4.67
C-Bombas 1	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Bombas 2	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Alumbrado Bombas	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Áreas comunes	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Ascensor	4,13	4,39	4,71	4.67
C-A. Ascensor	4,13	4,39	4,71	4.67
C-Piscina	4,13	4,39	4,71	4.67

La tabla 7.10 presenta los resultados de las diferentes simulaciones del Caso 2 bajo la norma IEC 60909 empelando las cuatro herramientas de simulación.

Se observa en la tabla 7.10 que los valores obtenidos son muy similares entre si y esto se debe a que en este caso no se modelan los conductores, al eliminar estas impedancias el valor de corriente de cortocircuito se unifica, se observa también que en el simulador LSPS todos los valores son iguales no se diferencia el valor en barras del sistema y en circuitos terminales, esto se debe a que los demás software de simulación tienen en cuenta impedancias en otros elementos como breakers y barras que hacen que se note una pequeña diferencia en estos puntos.

Las herramientas de simulación MELSH y LSPS no tienen la opción de simular empleando la norma ANSI/IEEE 141, por ende la tabla 7.11 muestra únicamente simulaciones empleando los software ETAP y DIGSILENT.

Tabla 7-12 Resultados de los cálculos de corriente de cortocircuito para el caso 1 y 2 con la norma ANSI/IEE 141

Ubicación	Con Conductores – ANSI/IEEE 141		Sin conductores – ANSI/IEEE 141	
	Corriente de cortocircuito I ^{"k} [kA] ETAP	Corriente de cortocircuito I ^{"k} [kA] DIGSILENT	Corriente de cortocircuito I ^{"k} [kA] ETAP	Corriente de cortocircuito I ^{"k} [kA] DIGSILENT
C-Barra 1	3,79	4.15	4,15	4.15
C-100	1,61	1.69	4,29	4.37
C-200	1,4	1.46	4,29	4.37
C-300	1,23	1.29	4,29	4.37
C-400	2,04	2.64	4,29	4.37
C-500	1,89	2.50	4,29	4.37
C-600	1,76	2.37	4,29	4.37
C-700	1,65	2.14	4,29	4.37
C-800	1,55	2.14	4,29	4.37
C-900	1,46	2.04	4,29	4.37
C-1000	1,38	1.95	4,29	4.37
C-1100	1,31	1.86	4,29	4.37
C-1200	1,24	1.78	4,29	4.37
C-1300	1,63	1.72	4,29	4.37
C-Barra 2	3,67	3.93	4,15	4.37
C-G.Bombas1	3,58	3.62	4,15	4.36
C-G.Bombas2	3,4	3.43	4,15	4.36
C-Bombas 1	3,4	3.43	4,29	4.36
C-Bombas 2	3,4	3.43	4,29	4.36
C-Alumbrado Bombas	3,55	3.44	4,29	4.36
C-Áreas comunes	3,73	3.73	4,29	4.36
C-Ascensor	0,335	0.35	4,29	4.36
C-A. Ascensor	2,8	2.86	4,29	4.36
C-Piscina	3,37	3.46	4,29	4.36

La tabla 7.11 muestra los resultados obtenidos al simular los casos 1 y 2 bajo la norma ANSI/IEC 141.

Se observa en la tabla 7.11 que los resultados obtenidos de los cálculos de corrientes de cortocircuito desarrollados con los software de simulación ETAP y DIGSILENT para los casos 1 y 2 bajo la norma ANSI/IEEE 141 son un poco mayores que los obtenidos cuando se realiza el cálculo bajo la norma IEC 60909, esto se debe a que la metodología planteada por la norma ANSI/ IEEE 141 se basa en las impedancias y la norma IEC 60909 se basa en corrientes.

Se debe tener en cuenta que cuando se están realizando los cálculos con la norma ANSI/IEEE se hace una suposición típica para grupos de motores pequeños (50HP o menos) donde 1HP = 1kVA y el promedio de reactancias subtransitorias es 25%. La resistencia es 4,167%, basado en la relación típica de $X/R = 6$. Lo que implica que los resultados con esta norma varíen ya que bajo la norma IEC 60909 esta consideración no es tomada en cuenta.

COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

- Al comparar los resultados obtenidos empleando la misma norma, pero distintos simuladores, en general se presentan valores cercanos, lo cual es más evidente cuando se observan las simulaciones en las cuales no se modelaron los conductores; sin embargo, cuando se modelaron los conductores, las corrientes entregadas por el simulador Digsilent tendieron a ser mayores que las demás. Se debe tener en cuenta que en cuanto a parámetros de simulación, Digsilent no cuenta con las liberarías para baja tensión que presentan los demás simuladores lo que influye en los resultados de las corrientes calculadas; se sugiere entonces que este simulador no sea utilizado para cálculos de sistemas de baja tensión.

8. CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES GENERALES.

- Se concluye que el profesional encargado del diseño eléctrico de una edificación debe seleccionar la marca de los dispositivos a utilizar, cables, protecciones y demás como referencia para la implementación de las simulaciones, cálculos y coordinación de protecciones; sin embargo, en caso de que se utilice otra marca diferente a la especificada por el diseñador; esta debe presentar características técnicas iguales o superiores y tener un precio en el mercado igual o inferior a dichas marcas seleccionadas. Además debe contar con un software de coordinación de protecciones para la adecuada selección de referencias y sus respectivas curvas termo magnéticas; con el fin de evidenciar de forma gráfica la selectividad asertiva entre las protecciones de los diferentes ramales del sistema; ya que las curvas y especificaciones técnicas varían entre de acuerdo a los diferentes fabricantes.
- Se llega a la conclusión de que para llevar a cabo un adecuado estudio de coordinación de protecciones es indispensable, haber realizado un cálculo de corriente de cortocircuito que permita hacer una buena selección y posterior coordinación de protecciones.
- Se concluye que es necesario implementar conductores en las simulaciones o cálculos de corrientes de cortocircuito para instalaciones eléctricas de uso final, a pesar de que las distancias de los alimentadores principales y ramales no afecta en gran medida estos cálculos y teniendo en cuenta que al momento de la selección de la protección el valor de Icu (Intensidad de cortocircuito ultimo realizada bajo el ensayo: Apertura – Cierre – Apertura) del dispositivo debe ser un poco mayor que el valor de la corriente de cortocircuito calculada es importante verificar que no exista un problema en la instalación, aguas abajo del alimentador principal, además que los valores obtenidos ayudan para la adecuada escogencia de todos los parámetros de las protecciones.
- Se concluye que es de gran importancia hacer una correcta verificación de las máximas longitudes de los conductores para la actuación instantánea de las protecciones seleccionadas, ya que si este criterio no es aplicado se estaría incurriendo en una falla gravísima ya que al momento de presentarse un cortocircuito, a pesar de tener las protección adecuada y los conductores adecuados, las protecciones no actuarían si las longitudes superan los valores establecidos según pruebas.

CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA METODOLOGÍA DE LAS NORMAS IEC 60909 Y ANSI/IEEE 141

- El procedimiento IEC se basa en corrientes mientras que el procedimiento ANAI/IEEE es un procedimiento basado en impedancias. En el IEC estas corrientes serán función del tipo de configuración de la red, de la relación X/R, de la clasificación de cada fuente de corriente de corto circuito como “cercana o lejana” al punto de falla, del tiempo de liberación de la falla y del tipo de sistema de excitación de los generadores síncronos.
- En cuanto al tipo de configuración de la red, el procedimiento IEC define tres tipos de redes (radial, mallada y no mallada) de acuerdo a la configuración que guardan las fuentes de corto circuito respecto al punto de falla. El procedimiento de cálculo de corrientes de corto circuito respecto al punto de falla. El procedimiento de cálculo de las corrientes de corto circuito variara de acuerdo a esta clasificación, haciendo el procedimiento más complicado pero más preciso. El método ANSI/IEEE no considera la configuración de la red, simplificando, en este aspecto, el procedimiento de cálculo. En cuanto a la relación X/R, ANSI/IEEE favorece usar una sola relación X/R mientras que en el procedimiento IEC cada contribuyente verá una relación X/R. Esto influye en cada modelación de la componente de CD de ambos procedimientos, haciendo que, en este punto, el IEC sea un procedimiento más apegado a la realidad, de mayor rigor y más exacto que el ANSI/IEEE.
- La tensión de prefalla que usa ANSI/IEEE es igual, a la tensión nominal del sistema a menos que se desee incorporar otras condiciones de operación del sistema, flexibilidad que presenta esa norma. En cambio el IEC considera un factor C de multiplicación para la tensión de prefalla ya establecido en su procedimiento independientemente de las condiciones de operación del sistema. Así pues, en este aspecto, la norma IEC es menos flexible.
- Las diferencias en la modelación de la red y de los componentes del sistema eléctrico de acuerdo a criterios propios de las normas afectan los resultados obtenidos. En particular, las diferencias en el tratamiento y en el modelo de los elementos rotatorios afectan los resultados en los cálculos de las diversas corrientes de los procedimientos. El proceso mismo de cálculo de las dos normas afecta los resultados obtenidos.
- El estándar ANSI/IEEE es más sencillo en su procedimiento debido a su carácter más práctico, por ende su modelación requiere menos datos con el consecuente ahorro de tiempo y de inversión en la búsqueda de esta información. Esto lo convierte en un método atractivo para su uso. Sin embargo esta misma característica de practicidad lo hace menos útil donde se requiere de cálculos más precisos. Asimismo el procedimiento de esta norma está fuertemente ligado a su aplicación a interruptores de circuito. Esto lo hace muy dependiente de los intereses comerciales y de los aspectos de la evolución tecnológica de estos equipos.

- El estándar IEC intrínsecamente posee una modelación más completa de las corrientes de falla debido a que los modelos de los componentes de la instalación y del sistema de suministro son más completos que el método ANSI/IEEE. Sin embargo, estas características lo hacen más demandante de más datos de entrada con los requerimientos de tiempo que esto conlleva. Lo anterior lleva a que IEC sea más preciso aunque más complejo de usar. IEC no relaciona el procedimiento de cálculo a su aplicación de interruptores u otro equipo, dándole un carácter más permanente y menos dependiente de los cambios de la tecnología asociados a estos equipos.

8.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.

- Se debe prestar especial atención a la hora de implementar las simulaciones en los diferentes software, ya que de acuerdo al orden en que se implementen los elementos de un diagrama unifilar así serán los resultados obtenidos, en especial con el orden de los conductores y las protecciones, se observa que se debe implementar primero el conductor y luego la protección, si la implementación es la contraria los software no tendrán en cuenta la impedancia de los conductores para el cálculo de corriente de cortocircuito y por lo tanto el resultado obtenido será una corriente mucho mayor a la real.
- DigSilent permite al momento de realizar un análisis de cortocircuito diferenciar entre las normas aplicables ya sea al IEC 60909 o la ANSI/IEEE 141, mientras que con el software Etap resulta más fácil implementar una nueva simulación ya que se hace necesario editar cada uno de los parámetros seleccionando la norma en específico bajo la cual se implementaran todos los cálculos así como también se debe crear un nuevo caso de estudio.
- Como el software está diseñado para alta y media tensión, los parámetros de las líneas que normalmente se desprecian en baja tensión, se deben tener en cuenta para realizar la simulación, es por ello, que realizar una simulación sin líneas en DigSilent puede traer inconvenientes al momento de realizar mediciones, pues es necesario agregar barras en los puntos donde se quiera medir.
- Para análisis de corto circuito en instalaciones de uso final, el software DigSilent representa una herramienta que exige mucho más trabajo de lo necesario y en comparación con otras herramientas de software empleadas a este nivel de tensión, el utilizarlo puede generar sobreesfuerzo poco necesario, por eso se concluye que no se debe utilizar para baja tensión.
- Se debe tener en cuenta que en Digsilent un interruptor de baja tensión se modela como un relé y necesita de un transformador de corriente con una relación 1^a:1^a y no es necesario adicionar breakers si solo se va calcular corto circuito; sin embargo, en la

práctica real no se utilizan transformadores de corriente para baja tensión, lo que hace que este software sea poco funcional en este campo, ya que lo deseable es poder implementar las simulaciones con los parámetros reales de los elementos que posteriormente se desean instalar.

- En Digsilent es necesario tener en cuenta la resistencia de los breakers, la cual en otros simuladores se desprecia; por esta razón se acumula una resistencia correspondiente a breakers aguas arriba de donde sucede la falla, lo cual se refleja en un amortiguamiento de la corriente de cortocircuito que esto se hace más evidente para cargas que están varios breakers aguas abajo del transformador. Sin embargo, para las simulaciones realizadas en este trabajo se asumió una resistencia de breakers considerablemente pequeña para no afectar en gran medida los resultados y poder tener un punto de comparación con los demás software.
- El software Digsilent contiene un gran número de aplicativos para la simulación de sistemas eléctricos, sin embargo, su diseño está enfocada para ser utilizada en circuitos de alta y media tensión, por ende, emplearla para baja tensión se convierte en una labor muy meticulosa en la cual se deben ingresar los respectivos parámetros y elementos del sistema eléctrico, ya que DigSilent no cuenta con una librería ó catalogo para baja tensión; lo cual si se encuentran en otras herramientas de simulación especializadas en baja tensión.

8.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

En este documento se desarrolló un estudio detallado de análisis de corrientes de cortocircuito con cuatro herramientas de simulación se considera de utilidad la implementación de estos cálculos en otras herramientas de simulación para análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones, dado que existen en el mercado otra gran cantidad de software que podrían ser explorados bajo la metodología planteada en este proyecto de grado. También se aclara que en este documento se hace énfasis en uno de los numerales exigidos al momento de realizar la inspección y certificación RETIE de una instalación eléctrica de uso final y dicho certificado garantiza que la instalación cumple con todos los requisitos de diseño y construcción exigidos para preservar la vida, por esto se considera de gran utilidad que en trabajos futuros se desarrollen los demás numerales exigido según el reglamento técnico de instalaciones eléctricas, y en cada caso se tengan presentes herramientas de software que garanticen la buena funcionalidad del diseño establecido por el profesional a cargo, así como el ahorro en tiempo y recursos.

Anexo 4A

Datos de impedancias típicas para estudios de cortocircuito según la norma ANSI/IEEE 141- 4

Las siguientes tablas y figuras aparecen en este anexo:

Tabla 4A-1 Valores de reactancia típica para máquinas de inducción y síncronas, en pu de la capacidad en KVA de la máquina.

Tabla 4A-2 Espaciamiento típico de conductores para líneas aéreas

Tabla 4A-3 Constantes de conductores de cobre para 1 pie de espacio simétrico.

Tabla 4A-4 Constantes de cable de aluminio reforzado con acero (ACSR), para 1 pie de espacio simétrico.

Tabla 4A-5 Facto de espaciamiento X_B para reactancias a 60 Hz, en ohm por conductor por 1000 pies.

Tabla 4A-6 Facto de espaciamiento X_B para reactancias a 60 Hz, en ohm por conductor por 1000 pies.

Tabla 4A-7 Datos aproximados de impedancia a 60 Hz para circuitos trifásicos, cable de cobre, en ohm por 1000 pies a 75°C.

Tabla 4A-8 Datos aproximados de impedancia a 60 Hz para circuitos trifásicos, cable de aluminio, en ohm por 1000 pies a 90°C.

Figura 4A-1 Relación X/R en transformadores.

Tabla 4A-1 VALORES DE REACTANCIA TÍPICA PARA MÁQUINAS DE INDUCCIÓN Y SÍNCRONAS, EN PU DE LA CAPACIDAD EN KVA DE LA MÁQUINA*.

	X'' d	X'd
Turbo Generadores ⁺		
8 Polos	0.09	0.15
4 Polos	0.15	0.23
Generadores de polos salientes con Devanados Amortiguadores ⁺		
12 Polos ó menos	0.16	0.33
14 Polos ó menos	0.21	0.33
Motores síncronos		
9 Polos	0.15	0.23
8-14 Polos	0.20	0.30
16 Polos ó mas	0.28	0.40
Condensadores Síncronos ⁺	0.24	0.37
Convertidores síncronos ⁺		
600 V CD	0.20	-
250 V CD	0.33	-
Motores de inducción grandes individuales, usualmente arriba de 600 V	0.17	-
Motores pequeños, usualmente 600 V y menores	Ver Tabla 4-1 y 4-2	

Nota: Aproximadamente los KVA base de los motores síncronos pueden ser encontrados a partir de la capacidad del motor en HP de la siguiente manera:

Motor con factor de potencia de 0.8 KVA base = Capacidad en HP

Motor con factor de potencia de 1.0 KVA base = 0.8 X Capacidad en HP

*Se recomienda usar los valores establecidos por el fabricante si estos se encuentran disponibles.

+ X'd normalmente no se usa en cálculos de cortocircuito.

Tabla 4A-2 ESPACIAMIENTO TÍPICO DE CONDUCTORES PARA LÍNEAS AÉREAS.

Tensión nominal del sistema (Volts)	Espaciamiento equivalente delta (Pulgadas)
120	12
240	12
480	18
600	18
2400	30
4160	30
6900	36
13800	42
23000	48
34500	54
69000	96
115000	204

Nota: Cuando se indique la sección transversal de conductores en los puntos de un triángulo con espaciamiento A, B Y C entre pares de conductores, la siguiente formula puede ser usada:

$$\text{Espaciamiento equivalente delta} = \sqrt[3]{A \cdot B \cdot C}$$

Cuando los conductores se localicen en un lugar y los conductores externos se espacien igualmente a la distancia A del conductor de en medio, el equivalente es 1.26 veces la distancia de A:

$$\text{Espaciamiento equivalente delta} = \sqrt[3]{A \cdot A \cdot 2A} = 1.26A$$

Tabla 4A-3 CONSTANTES DE CONDUCTORES DE COBRE PARA 1 PIE DE ESPACIO SIMÉTRICO.

Tamaño de conductor		Resistencia R a 50° C, 60 Hz	Reactancia X _A a 1 ft de espaciamento, 60 Hz
(cmil)	(No.AWG)	(Ω/Conductor/1000 ft)	(Ω/Conductor/1000 ft)
1000000		0.0130	0.0758
900000		0.142	0.0769
800000		0.0159	0.0782
750000		0.0168	0.0790
700000		0.0179	0.0800
600000		0.0206	0.0818
500000		0.0246	0.0839
450000		0.0273	0.0854
400000		0.0307	0.0867
350000		0.0348	0.0883
300000		0.0407	0.0902
250000		0.04878	0.0922
211600	4/0	0.0574	0.0953
167800	3/0	0.0724	0.0981
133100	2/0	0.0911	0.101
105500	1/0	0.115	0.103
83690	1	0.145	0.106
66370	2	0.181	0.108
52630	3	0.227	0.111
41740	4	0.288	0.113
33100	5	0.362	0.116
26250	6	0.453	0.121
20800	7	0.570	0.123
16510	8	0.720	0.126

Nota: Para un circuito trifásico la impedancia total, de línea a neutro, es:

$$Z = R + j(X_A + X_B)$$

*Para otros espaciamentos use factores de espaciamento de X_B de las Tablas 4^a-5 y 4^a-6.

Tabla 4A-4 CONSTANTES DE CABLE DE ALUMINIO REFORZADO CON ACERO (ACSR), PARA 1 PIE DE ESPACIO SIMÉTRICO.

Tamaño de conductor		Resistencia R a 50° C, 60 Hz	Reactancia X _A a 1 ft de espaciamento, 60 Hz
(cmil)	(No.AWG)	(Ω/Conductor/1000 ft)	(Ω/Conductor/1000 ft)
1590000		0.0129	0.0679
1431000		0.0144	0.0692
1272000		0.0161	0.0704
1192500		0.0171	0.0712
1113000		0.0183	0.0719
954000		0.0213	0.0738
795000		0.0243	0.0744
715500		0.0273	0.0756
636000		0.0307	0.0768
556500		0.0352	0.0786
477000		0.0371	0.0802
397500		0.0445	0.0824
336400		0.0526	0.0843
266800		0.0662	0.0945
	4/0	0.0835	0.1099
	3/0	0.1052	0.1175
	2/0	0.1330	0.1212
	1/0	0.1674	0.1242
	1	0.2120	0.1259
	2	0.2670	0.1215
	3	0.3370	0.1251
	4	0.4240	0.1240
	5	0.5340	0.1259
	6	0.6740	0.1273

Nota: Para un circuito trifásico la impedancia total, de línea a neutro, es:

$$Z = R + j (X_A + X_B)$$

*Para otros espaciamientos use factores de espaciamento de X_B de las Tablas 4^a-5 y 4^a-6.

Tabla 4A-5 FACTO DE ESPACIAMIENTO X_B PARA REACTANCIAS A 60 HZ, EN OHM POR CONDUCTOR POR 1000 PIES.

Separación (pulgadas)												
(pies)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	0.0571	0.0412	0.0319	0.0252	0.0201	0.0159	0.0124	0.0093	0.0066	0.0042	0.0020
2	0.0159	0.0018	0.0035	0.0051	0.0061	0.0080	0.0093	0.0106	0.0117	0.0129	0.0139	0.0149
3	0.0159	0.0169	0.0178	0.0186	0.0195	0.0203	0.0211	0.0218	0.0225	0.0232	0.0239	0.0246
4	0.0252	0.0259	0.0265	0.0271	0.0277	0.0282	0.0288	0.0293	0.0299	0.0304	0.0309	0.0314
5	0.0319	0.0323	0.0328	0.0333	0.0337	0.0341	0.0346	0.0350	0.0354	0.0358	0.0362	0.0366
6	0.0370	0.0374	0.0377	0.0381	0.0385	0.0388	0.0392	0.0395	0.0399	0.0402	0.0405	0.0409
7	0.0412	0.0415	0.0418	0.0421	0.0424	0.0427	0.0430	0.0433	0.0436	0.0439	0.0442	0.0445
8	0.0447	0.0450	0.0453	0.0455	0.0458	0.0460	0.0463	0.0468	0.0468	0.0471	0.0473	0.0476
8	0.0478											

Tabla 4A-6 FACTO DE ESPACIAMIENTO X_B PARA REACTANCIAS A 60 HZ, EN OHM POR CONDUCTOR POR 1000 PIES.

Separación (Cuarto de pulgada)				
(pies)	0	1	2	3
0	-	-	-0.0729	-0.063.6
1	-0.0571	-0.0519	-0.0477	-0.0443
2	-0.0412	-0.0384	-0.0359	-0.0339
3	-0.0319	-0.0301	-0.0282	-0.0267
4	-0.0252	-0.0238	-0.0225	-0.0212
5	-0.0201	-0.01795	-0.01795	-0.01684
6	-0.0159	-0.01494	-0.01399	-0.01323
7	-0.0124	-0.01152	-0.01078	-0.01002
8	-0.0093	-0.00852	-0.00794	-0.00719
9	-0.0066	-0.00605	-0.00529	-0.00474
10	-0.0042	-	-	-
11	-0.0020	-	-	-
12	-	-	-	-

Tabla 4A-7 DATOS APROXIMADOS DE IMPEDANCIA A 60 HZ PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS, CABLE DE COBRE, EN OHM POR 1000 PIES A 75°C.

10 Tres mono conductores

AWG o KCM	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV			600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
8	0.0811	0.0754	0.814	0.811	0.0860	0.816	0.811	0.0603	0.813	0.811	0.0688	0.814
8 (Sólido)	0.786	0.0754	0.790	0.786	0.0860	0.791	0.786	0.0603	0.788	0.786	0.0688	0.789
6	0.510	0.685	0.515	0.510	0.0796	0.516	0.510	0.0548	0.513	0.510	0.0636	0.514
6 (Sólido)	0.496	0.0685	0.501	0.496	0.0796	0.502	0.496	0.0548	0.499	0.496	0.0636	0.500
4	0.321	0.0632	0.327	0.321	0.0742	0.329	0.321	0.0506	0.325	0.321	0.0594	0.326
4 (Sólido)	0.321	0.0632	0.318	0.312	0.0742	0.321	0.312	0.0506	0.316	0.312	0.0594	0.318
2	0.202	0.0585	0.210	0.202	0.0685	0.214	0.202	0.0467	0.207	0.202	0.0547	0.209
1	0.160	0.0570	0.170	0.160	0.0675	0.174	0.160	0.0456	0.166	0.160	0.0540	0.169
1/0	0.128	0.0540	0.139	0.128	0.0635	0.143	0.127	0.0432	0.134	0.128	0.0507	0.138
2/0	0.102	0.0533	0.115	0.103	0.0630	0.121	0.101	0.0426	0.110	0.102	0.0504	0.114
3/0	0.0805	0.0519	0.0958	0.0814	0.0605	0.101	0.0766	0.0415	0.0871	0.0805	0.0484	0.0939
4/0	0.0640	0.0497	0.0810	0.0650	0.0583	0.0929	0.0633	0.0398	0.0748	0.0640	0.0466	0.0792
250	0.0552	0.0552	0.0495	0.0742	0.0557	0.0797	0.0541	0.0396	0.0670	0.0547	0.0456	0.0712
300	0.0464	0.0493	0.0677	0.0473	0.0564	0.0736	0.0451	0.0394	0.0559	0.0460	0.0451	0.0644
350	0.0378	0.0491	0.0617	0.0386	0.0562	0.0681	0.0368	0.0393	0.0536	0.0375	0.0450	0.0586
400	0.0356	0.0490	0.0606	0.0362	0.0548	0.0657	0.0342	0.0392	0.0520	0.0348	0.0438	0.0559
450	0.0322	0.0480	0.0578	0.0328	0.0538	0.0630	0.0304	0.0384	0.0490	0.0312	0.0430	0.0559
500	0.0294	0.0466	0.0551	0.0300	0.0526	0.0505	0.0276	0.0373	0.0464	0.0284	0.0421	0.0531
600	0.0257	0.0463	0.0530	0.0264	0.0516	0.0580	0.0237	0.0371	0.0440	0.0246	0.0412	0.0479
750	0.0216	0.0445	0.0495	0.0223	0.0497	0.0545	0.0194	0.0356	0.0405	0.0203	0.0396	0.0445

NOTA: La resistencia está basada en cobre estañado a 60 Hz, cable de 600V y 5kV sin pantalla, basada en aislamiento cábrico barnizado, cable de 5V con pantalla y 15 Kv basada en aislamiento de neopreno.

* Los valores de resistencia (RL) a bajas temperaturas del cobre (TL) son obtenidos usando la fórmula:

$$R_L = \frac{R_{75}(234.5 + T_L)}{309.5}$$

Tabla 4A-7 DATOS APROXIMADOS DE IMPEDANCIA A 60 HZ PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS, CABLE DE COBRE, EN OHM POR 1000 PIES A 75°C.

(b) Cable de tres conductores

AWG o KCM	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV			600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
8	0.0811	0.0577	0.813	0.811	0.0658	0.814	0.811	0.0503	0.812	0.811	0.0574	0.813
8 (Sólido)	0.786	0.0577	0.788	0.786	0.0658	0.789	0.786	0.0503	0.787	0.786	0.0574	0.788
6	0.510	0.0525	0.513	0.510	0.0610	0.514	0.510	0.0457	0.512	0.510	0.0531	0.513
6 (Sólido)	0.496	0.0525	0.499	0.496	0.0610	0.500	0.496	0.0457	0.498	0.496	0.0531	0.499
4	0.321	0.0483	0.325	0.321	0.0568	0.326	0.321	0.0422	0.324	0.321	0.0495	0.325
4 (Sólido)	0.321	0.0483	0.316	0.312	0.0508	0.317	0.312	0.0422	0.315	0.312	0.0495	0.316
2	0.202	0.0448	0.207	0.202	0.0524	0.209	0.202	0.0390	0.206	0.202	0.0457	0.207
1	0.160	0.0436	0.166	0.160	0.0516	0.168	0.160	0.0380	0.164	0.160	0.0450	0.166
1/0	0.128	0.0414	0.135	0.128	0.0486	0.137	0.127	0.0360	0.132	0.128	0.0423	0.135
2/0	0.102	0.0407	0.110	0.103	0.0482	0.114	0.101	0.0355	0.107	0.102	0.0420	0.110
3/0	0.0805	0.0397	0.0898	0.0814	0.0463	0.0936	0.0766	0.0346	0.0841	0.0805	0.0403	0.090
4/0	0.0640	0.0381	0.0745	0.0650	0.0446	0.0788	0.0633	0.0332	0.0715	0.0640	0.0389	0.0749
250	0.0552	0.0379	0.0670	0.0557	0.0436	0.0707	0.0541	0.0330	0.0634	0.0547	0.0380	0.0666
300	0.0464	0.0377	0.0598	0.0473	0.0431	0.0640	0.0451	0.0329	0.0559	0.0460	0.0376	0.0596
350	0.0378	0.0373	0.0539	0.0386	0.0427	0.0546	0.0368	0.0328	0.0492	0.0375	0.0375	0.0530
400	0.0356	0.0371	0.0514	0.0362	0.0415	0.0551	0.0342	0.0327	0.0475	0.0348	0.0366	0.0505
450	0.0322	0.0361	0.0484	0.0328	0.0404	0.0520	0.0304	0.0320	0.0441	0.0312	0.0359	0.0476
500	0.0294	0.0349	0.0456	0.0300	0.0394	0.0495	0.0276	0.0311	0.0416	0.0284	0.0351	0.0453
600	0.0257	0.0343	0.0429	0.0264	0.0382	0.0464	0.0237	0.0309	0.0389	0.0246	0.0344	0.0422
750	0.0216	0.0326	0.0391	0.0223	0.0364	0.0427	0.0197	0.0297	0.0355	0.0203	0.0332	0.0389

NOTA: La resistencia está basada en cobre estañado a 60 Hz, cable de 600V y 5kV sin pantalla, basada en aislamiento cábrico barnizado, cable de 5V con pantalla y 15 Kv basada en aislamiento de neopreno.

* Los valores de resistencia (RL) a bajas temperaturas del cobre (TL) son obtenidos usando la fórmula:

$$R_L = \frac{R_{75}(234.5 + T_L)}{309.5}$$

Tabla 4A-8 DATOS APROXIMADOS DE IMPEDANCIA A 60 HZ PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS, CABLE DE ALUMINIO, EN OHM POR 1000 PIES A 90°C*.

11 Tres mono conductores

AWG o KCM	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV			600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
6	0.847	0.053	0.849	-	-	-	0.847	0.042	0.848	-	-	-
4	0.532	0.050	0.534	0.532	0.068	0.536	0.532	0.040	0.534	0.532	0.054	0.535
2	0.335	0.046	0.338	0.335	0.063	0.341	0.335	0.037	0.337	0.335	0.050	0.339
1	0.265	0.048	0.269	0.265	0.059	0.271	0.265	0.035	0.267	0.265	0.047	0.269
1/0	0.210	0.043	0.214	0.210	0.056	0.217	0.210	0.034	0.213	0.210	0.045	0.215
2/0	0.167	0.041	0.172	0.167	0.055	0.176	0.167	0.033	0.170	0.167	0.044	0.173
3/0	0.133	0.040	0.139	0.132	0.053	0.142	0.133	0.037	0.137	0.132	0.042	0.139
4/0	0.106	0.039	0.113	0.105	0.051	0.117	0.105	0.031	0.109	0.105	0.041	0.113
250	0.0896	0.0384	0.0975	0.0892	0.0495	0.102	0.0894	0.0307	0.0945	0.0891	0.0396	0.0975
300	0.0750	0.0375	0.0839	0.0746	0.0479	0.0887	0.0746	0.0300	0.0804	0.0744	0.0383	0.0837
350	0.0644	0.0369	0.0742	0.0640	0.0468	0.0793	0.0640	0.0245	0.0705	0.0638	0.0374	0.0740
400	0.0568	0.0364	0.0675	0.0563	0.0459	0.0726	0.0563	0.0291	0.0634	0.0560	0.0367	0.0700
500	0.0459	0.0355	0.0580	0.0453	0.0444	0.0634	0.0453	0.0284	0.0535	0.0450	0.0355	0.0573
600	0.0388	0.0359	0.0529	0.0381	0.0431	0.0575	0.0381	0.0287	0.0477	0.0377	0.0345	0.0511
700	0.0338	0.0350	0.0487	0.0332	0.0423	0.0538	0.0330	0.0280	0.0433	0.0326	0.0338	0.0470
750	0.0318	0.0341	0.0466	0.0310	0.0419	0.0521	0.0309	0.0273	0.0412	0.0304	0.0335	0.0452
1000	0.0252	0.0341	0.0424	0.0243	0.0414	0.0480	0.0239	0.0273	0.0363	0.0234	0.0331	0.0405

NOTA: Cable con aislamiento de polietileno de cadena cruzada.

* Los valores de resistencia (RL) a bajas temperaturas del aluminio (TL) son obtenidos usando la fórmula:

$$R_L = \frac{R_{90}(228.1 + T_L)}{318.1}$$

Tabla 4A-8 DATOS APROXIMADOS DE IMPEDANCIA A 60 HZ PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS, CABLE DE ALUMINIO, EN OHM POR 1000 PIES A 90°C*.

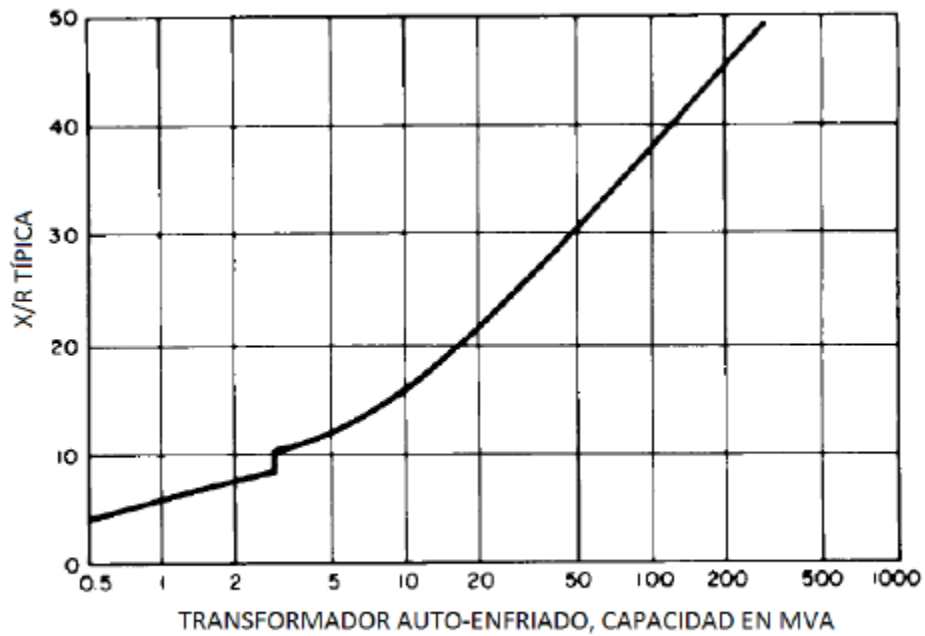
12 Cable de tres conductores

AWG o KCM	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV			600V y 5 Kv sin pantalla			5 KV con pantalla y 15 KV		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
6	0.847	0.053	0.849	-	-	-	0.847	0.042	0.848	-	-	-
4	0.532	0.050	0.534	-	-	-	0.532	0.040	0.534	-	-	-
2	0.335	0.046	0.338	0.335	0.056	0.340	0.335	0.037	0.337	0.335	0.045	0.338
1	0.265	0.048	0.269	0.265	0.053	0.270	0.265	0.035	0.267	0.265	0.042	0.268
1/0	0.210	0.043	0.214	0.210	0.050	0.216	0.210	0.034	0.213	0.210	0.040	0.214
2/0	0.167	0.041	0.172	0.167	0.049	0.174	0.167	0.033	0.170	0.167	0.039	0.171
3/0	0.133	0.040	0.139	0.133	0.048	0.141	0.133	0.037	0.137	0.132	0.038	0.138
4/0	0.106	0.039	0.113	0.105	0.045	0.114	0.105	0.031	0.109	0.105	0.036	0.111
250	0.0896	0.0384	0.0975	0.0895	0.0436	0.100	0.0894	0.0307	0.0945	0.0893	0.0349	0.0959
300	0.0750	0.0375	0.0839	0.0748	0.0424	0.0860	0.0746	0.0300	0.0804	0.0745	0.0340	0.0819
350	0.0644	0.0369	0.0742	0.0643	0.0418	0.0767	0.0640	0.0245	0.0705	0.0640	0.0334	0.0722
400	0.0568	0.0364	0.0675	0.0564	0.0411	0.0700	0.0563	0.0291	0.0634	0.0561	0.0329	0.0650
500	0.0459	0.0355	0.0580	0.0457	0.0399	0.0607	0.0453	0.0284	0.0535	0.0452	0.0319	0.0553
600	0.0388	0.0359	0.0529	0.0386	0.0390	0.0549	0.0381	0.0287	0.0477	0.0380	0.0312	0.0492
700	0.0338	0.0350	0.0487	0.0335	0.0381	0.0507	0.0330	0.0280	0.0433	0.0328	0.0305	0.0448
750	0.0318	0.0341	0.0466	0.0315	0.0379	0.0493	0.0309	0.0273	0.0412	0.0307	0.0303	0.0431
1000	0.0252	0.0341	0.0424	0.0248	0.0368	0.0444	0.0239	0.0273	0.0363	0.0237	0.0394	0.0378

NOTA: Cable con aislamiento de polietileno de cadena cruzada.

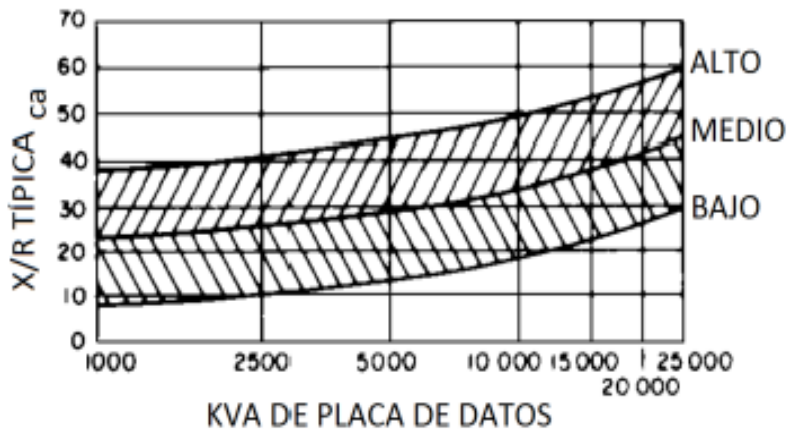
* Los valores de resistencia (RL) a bajas temperaturas del aluminio (TL) son obtenidos usando la fórmula:

$$R_L = \frac{R_{90}(228.1 + T_L)}{318.1}$$



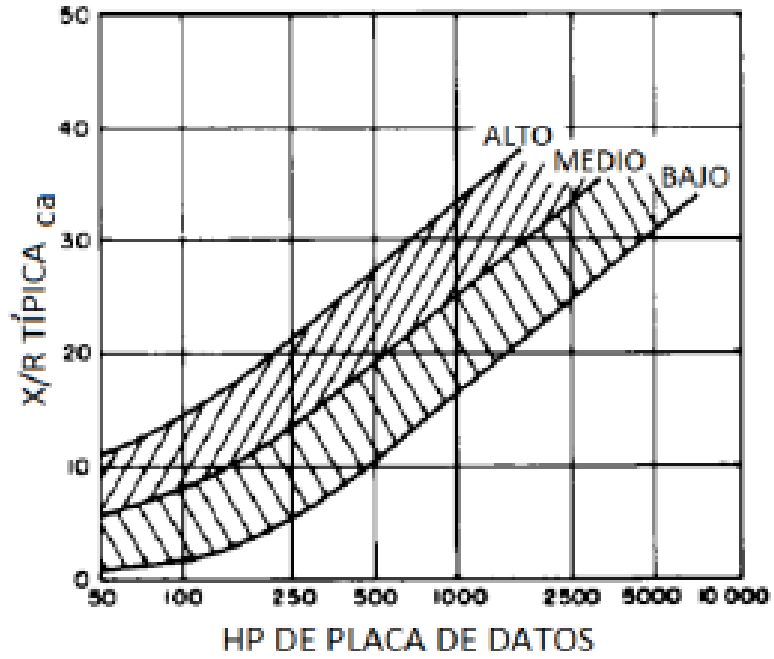
Fuente: Basado en IEEE Std. C37.010-1979.

Figura 4A -1 RELACIÓN X/R EN TRANSFORMADORES.



Fuente: Reimpreso de IEEE Std. C37.010-1979.

Figura 4A -2 RELACIÓN X/R EN PEQUEÑOS GENERADORES Y MOTORES SÍNCRONOS (DE ROTOR LISO Y POLOS SALIENTES)



Fuente: Reimpreso de IEEE Std C37.010-1979.

Figura 4A-3 RELACIÓN X/R PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

Bibliografía

- [1] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE): *Anexo General del RETIE Resolución 90708 de agosto 30 de 2013.*
- [2] Rieffel Vivanco, Jean C. “IEC” *Short Circuit Calculation, Cement Industry Technical Conference.* IEEE. 1998.
- [3] IEC 60909. Internacional standard: *Short-circuit current calculation in three- phase a.c. systems.* 1st Edition. 1988.
- [4] Ramon M. Mujal Rosas, Protecciones de sistemas eléctricos de potencia, Univ. Politèc. de Catalunya, septiembre de 2002, Internet [en línea] Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=64PKPK-liFEC&pg>
- [5] B. de Metz- Noblat, F. Dumes, G. Thomasset. Cuaderno técnico n°158 cálculo de corrientes de cortocircuito, Schneider electric. Internet [en línea] Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/cuadernostecnicos/ct1581.pdf>
- [6] Ing. Rolando F.Z.M. Capítulo 4 ANSI/IEEE 141 Std. 141-1993, Área eléctrica 2015 rfzm books
- [7] Ing Pedro A. Cediél Gomez Coordinación de protecciones BT. Schneider electric. Internet [en línea] Disponible en: <https://www.schneider-electric.com.co/documents/eventos/memorias-jornadas-conecta/Confiabilidad/Coordinacion-de-Protecciones-BT.pdf>
- [8] Cables para construcción catálogo de Centelsa ,Consultado en septiembre del 2017 Internet [en línea] Disponible en: <http://www.centelsa.com/cables-para-construccion/>
- [9] Conductores Electricos de Uso Obligatorio Según el RETIE, Boletín técnico. Diciembre del 2004, Internet [en línea] Disponible en: <http://www.centelsa.com.co/archivos/d241a0a2.pdf>
- [10] Procables catálogo de productos, Publicado en el 2014, Internet [en línea] Disponible en: http://procables.com.co/downloads/procables_catalogoproductos_2014_web.pdf
- [11] Norma técnica colombiana, Código eléctrico colombiano, NTC 2050, Noviembre de 1998.
- [12] Norma técnica colombiana Electrotecnia. Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquidos. Corriente sin carga, Pérdidas y tensión de cortocircuito NTC 819, Noviembre de 1995.

- [13] EPM, Normas de materiales para redes aéreas, transformadores que quedarán conectados al sistema de EE.PP.M. E.S.P. RA7-060, Mayo de 2005, Internet [en línea] Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/Portals/0/Users/001/01/1/RA7-060.pdf>

- [14] EPM, Fusibles para protección de ramales y transformadores de distribución a instalar en poste RA8-005, Julio de 2011, Internet [en línea] Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_8_normas_tecnicas/NORMASRA8_005_JULIO.pdf

- [15] Guía de usuario Etap 12.6, Marzo de 2014, Internet [en línea] Disponible en: <http://ingenieriaelectromecanica-rfzm.blogspot.com.co/2016/07/guia-de-usuario-etap-126.html>

- [16] Asociación electrotécnica argentina, Reglas particulares para la ejecución de las instalaciones eléctricas en inmuebles, 2016, Internet [en línea] Disponible en: http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6787/mod_resource/content/1/770_2016_Viviendas_4.0_para_Discusi%C3%B3n_P%C3%ABlica.pdf