

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

REPORTE FINAL DE RESIDENCIAS PROFESIONALES EXTERNAS.

TEMA:

“CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES”

LUGAR DE REALIZACIÓN:

“INGENIO CENTRAL MOTZORONGO S.A. DE C.V.”

ASESOR EXTERNO:

ING. CARLOS SÁNCHEZ DURÁN.

ASESOR INTERNO:

ING. RICARDO JULIO LÓPEZ MARTÍNEZ.

PRESENTA:

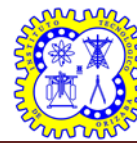
LIZBETH ISIDRO HERNÁNDEZ.

No. DE CONTROL:

09011094

ORIZABA, VER.

NOVIEMBRE/2013



GLOSARIO:

Cortocircuito: Conexión de baja impedancia entre dos elementos que se encuentran a diferente potencial.

Impedancia: Oposición al paso de la corriente eléctrica. Se presenta en circuitos de corriente alterna, generalmente se compone por elementos inductivos y capacitivos.

Arco eléctrico: Descarga eléctrica producida generada por la ionización del aire entre dos elementos que se encuentran a diferente potencial.

Interruptor: Dispositivo encargado de interrumpir el paso de la corriente eléctrica.

Medio de extinción: Medio utilizado para limitar y/o eliminar la magnitud de la corriente de cortocircuito.

Hexafluoruro de azufre: Gas inerte, más pesado que el aire. Utilizado como medio de extinción del arco eléctrico.

Hertz: Unidad de medida de la frecuencia.

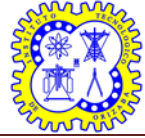
Onda senoidal: Señal de corriente alterna que varía a través del tiempo.

Fuentes de cortocircuito: Equipos eléctricos que aportan corrientes de cortocircuito cuando ocurre una falla.

Generador eléctrico: Máquina eléctrica, capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Motor eléctrico: Máquina eléctrica encargada de transformar la energía eléctrica en energía mecánica

Transformador: Máquina eléctrica capaz de modificar los parámetros de voltaje y corriente, manteniendo el mismo nivel de potencia.



Compañía suministradora: Empresa encargada de distribuir energía eléctrica a los consumidores.

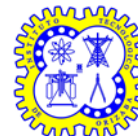
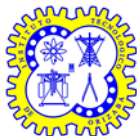
Conductores eléctricos: Elementos que ofrecen poca resistencia al paso de la corriente eléctrica.

Falla trifásica: Falla que se presenta cuando las 3 fases se unen físicamente, sin presentar resistencia.

Falla de línea a tierra: Falla que se presenta cuando cualquiera de las tres fases se pone en contacto indirecto con tierra. En el caso de motores eléctricos, este tipo de fallas se presenta de manera típica cuando cualquiera de las fases se pone en contacto con la carcasa.

Sistema en por unidad: Es la relación entre una cantidad determinada y la cantidad base. Este sistema es utilizado en el área eléctrica para determinar diversos parámetros, tales como voltaje, corriente, potencia, etc.

Diagrama unifilar: Diagrama que indica por medio de una sola línea la interconexión y partes componentes de un circuito o sistema eléctrico.



ÍNDICE GENERAL:

CAPÍTULO I

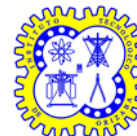
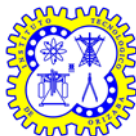
PROTECCIÓN A SISTEMAS ELÉCTRICOS

1.1 Generalidades:	16
1.2 Características de los dispositivos de protección:	18
1.2.1 Confiabilidad:	18
1.2.2 Economía:.....	18
1.2.3 Selectividad:	19
1.3 Clasificación de los interruptores:	19
1.3.1 Fusibles:	20
1.3.1.1 Clasificación de los fusibles:	21
1.3.1.1.1 Clasificación por tipo de operación:	22
1.3.1.1.2 Clasificación por velocidad de operación.....	24
1.3.1.1.3 Clasificación por capacidad interruptiva:.....	25
1.3.2 Interruptores en aceite:	26
1.3.3 Interruptores en gas (Sf_6):.....	28
1.3.4 Interruptores en vacío:	31

CAPÍTULO II

CORTOCIRCUITO

2.1 Introducción:	33
2.1.1 Características de la corriente de cortocircuito:	34
2.2 Fuentes de cortocircuito:	35
2.2.1 Compañía suministradora de energía:.....	35
2.2.2 Generadores:.....	36
2.2.3 Motores síncronos:	36



2.2.4 Motores de inducción:.....	36
2.3 Componentes limitadores de la corriente de cortocircuito:	37
2.3.1 Reactancia del transformador:.....	38
2.3.2 Reactores:	38
2.3.3 Conductores:	38
2.4 Reactancias de las máquinas eléctricas:	39
2.5 Tipos de cortocircuito:.....	40
2.6 Valores en por unidad:.....	42
2.6.1 Cambio de base para los valores en por unidad:.....	43
2.6.2 Conversión de valores en por unidad a valores reales:	43
2.7 Métodos de análisis de cortocircuito:.....	44
2.7.1 Método equivalente de Thévenin.....	44
2.7.2 Método de los MVA	50

CAPÍTULO III

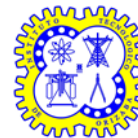
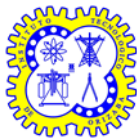
CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO A UN SISTEMA INDUSTRIAL.

3.1 Método equivalente de Thévenin.....	53
3.2 Método de los MVA	72
3.3 Cálculo de Fallas En ccm's por el método equivalente de Thévenin.....	79

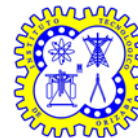
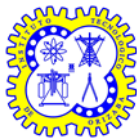
CAPÍTULO IV

OPTIMIZACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS.

4.1 Introducción:	115
4.2. Bus No. 1:.....	115
4.2.1 Circuito calderas:	115
4.2.1.1 Ccm-1.Circuito calderas:.....	116
4.2.1.2 Ccm-2.Circuito calderas.....	118
4.2.2 Circuito bombas de petróleo:	118



4.2.3 Ccm-1. Circuito bombas de petróleo.	119
4.2.4 Circuito bombas de agua:	120
4.3 Bus No.2:	122
4.3.1 Circuito Batey-Molinos:	123
4.3.1.1Ccm-1. Circuito Batey-Molinos:	124
4.3.1.3 Ccm-3. Circuito Batey-Molinos:	126
4.3.1.4 Ccm-4. Circuito Batey-Molinos:	127
4.3.2 Circuito Clarificación - Evaporación:	128
4.3.2.1 Ccm -1. Circuito Clarificación-Evaporación:.....	130
4.3.2.2 Ccm-2. Circuito Clarificación-Evaporación:.....	131
4.3.2.3 Ccm-3. Circuito Clarificación-Evaporación:.....	132
4.3.2.4 Ccm-4 Circuito Clarificación-Evaporación.....	133
4.3.2.5 Ccm-5. Circuito Clarificación-Evaporación.....	134
4.3.3 Circuito manejo de azúcar:	135
4.4 Bus. No.3:	136
4.4.1 Oficinas administrativas.	137
4.4.1.1Ccm-1. (Laboratorio Químico). Circuito oficinas administrativas.....	138
4.4.1.2 Ccm-2. (Taller Mecánico). Circuito oficinas administrativas.....	139
4.4.2 Circuito cristalización:	140
4.4.2.1 Ccm-1. Circuito cristalización:.....	140
4.4.2.2 Ccm-12. Circuito cristalización.....	142
4.4.3 Circuito bombas de inyección:	143
4.4.4 Circuito bombas de rechace:	144
4.5 Coordinación de protecciones	1446
4.5. 1 Características funcionales de un sistema de protección	1447
4.5.2 Estructura de un sistema de protección.....	144



ÍNDICE DE IMÁGENES:

CAPÍTULO I

Imagen 1.3. 1	Clasificación de los interruptores.....	20
Imagen 1.3. 1.1	Componentes de un cortacircuito fusible.....	20
Imagen 1.3. 1.1.1	Clasificación de los fusibles.....	21
Imagen 1.3. 2.1	Componentes del interruptor de aceite.....	26
Imagen 1.3.3.1	Principio de funcionamiento de interruptores en sf6.....	29
Imagen 1.3.4.1	Componentes del interruptor en vacio.....	31

CAPÍTULO II

Imagen 2.2.4.1	Formas de onda de las diferentes fuentes de cortocircuito	36
Imagen 2.4.1	Forma de onda de la corriente de cortocircuito	38
Imagen 2.4.2	Tipos de reactancias.	39
Imagen 2.5.1	Tipos de cortocircuito existentes	41
Imagen 2.7.1.1	Circuito equivalente de Thévenin	43

CAPÍTULO III

Imagen 3.1.1	Diagrama unifilar Central Motzorongo	53
Imagen 3.1.2	Diagrama de reactancias.....	55
Imagen 3.1.3	Zonas de falla a calcular.....	56
Imagen 3.3.1	Diagrama unifilar bus 1.....	78
Imagen 3.3.2	Circuito equivalente ccm-1 calderas.....	79
Imagen 3.3.3	Circuito equivalente calderas.....	81
Imagen 3.3.4	Circuito equivalente total. Área calderas	82
Imagen 3.3.5	Diagrama circuito calderas.....	84
Imagen 3.3.6	Diagrama circuito bombas de agua	86

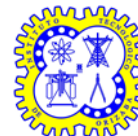
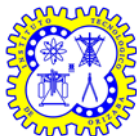
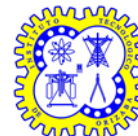
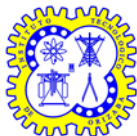


Imagen 3.3.7 Diagrama circuito bombas de petróleo	87
Imagen 3.3.8 Diagrama circuito secado y envase	90
Imagen 3.3.9 Diagrama circuito Batey-Molinos	91
Imagen 3.3.10 Diagrama circuito Clarificación-Evaporación	94
Imagen 3.3.11 Diagrama circuito oficinas administrativas.....	100
Imagen 3.3.12 Diagrama circuito cristalización	102
Imagen 3.3.13 Diagrama circuito Bombas de inyección.....	104
Imagen 3.3.14 Diagrama circuito bombas de rechace	105
Imagen 3.3.15 Diagrama circuito centrífugas de A.....	108

CAPÍTULO IV

Imagen 4.5.2.1 Protecciones primarias	152
---	-----



ÍNDICE DE TABLAS:

CAPÍTULO I

Tabla 1.3.1.1.3.1 Capacidad interruptiva de los fusibles	25
Tabla 1.3. 2.1 Ventajas y desventajas de interruptores en aceite	27

CAPÍTULO II

Tabla 2.6.2.1 Conversión de valores en p.u. a valores reales.....	42
Tabla 2.7.1.1 Fórmulas para obtener magnitudes eléctricas por el método equivalente de Thévenin.....	46
Tabla 2.7.1.2 Valores de reactancias equivalentes para motores	47
Tabla 2.7.1.3 Fórmulas para obtener valores de corriente y potencia de cortocircuito	48
Tabla 2.7.2.1 Obtención de potencia de cortocircuito por el método de los MVA	50
Tabla 2.7.2.2.Fórmulas para resolver circuitos serie y paralelo por el Método de los MVA	51

CAPÍTULO III

Tabla 3.1.1 Valores de reactancias en transformadores	54
Tabla 3.1.2 Valores de reactancia del generador eléctrico	55
Tabla 3.1.3 Falla No.1. Salida del generador	57
Tabla 3.1.4 Falla No. 2. Lado de alta tensión del trafo No. 1	58
Tabla 3.1.5 Falla No. 3. Lado de baja tensión del trafo No.1	59
Tabla 3.1.6 Falla No. 4. Lado de alta tensión del trafo No. 2	60
Tabla 3.1.7 Falla No. 5. Lado de baja tensión del trafo No.2	60
Tabla 3.1.8 Falla No. 6. Lado de alta tensión del trafo No. 3	61

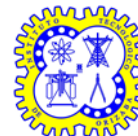
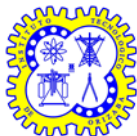


Tabla 3.1.9 Falla No. 7. Lado de baja tensión del trafo No.3	62
Tabla 3.1.10 Falla No. 8. Lado de alta tensión del trafo No.4	63
Tabla 3.1.11 Falla No. 9. Lado de baja tensión del trafo No.4	64
Tabla 3.1.12 Falla No.10. Lado de alta tensión del trafo No.5	64
Tabla 3.1.13 Falla No.11. Lado de baja tensión del trafo No.5	65
Tabla 3.1.14 Falla No.12. Lado de alta tensión del trafo No.6.	66
Tabla 3.1.15 Falla No. 13. Lado de baja tensión del trafo No.6.....	67
Tabla 3.1.16 Falla No. 14. Lado de alta tensión del trafo No.7	68
Tabla 3.1.17 Falla No. 15. Lado de baja tensión del trafo No.7	68
Tabla 3.1.18 Tabla	68
Tabla 3.2.1 Falla No. 1. Método de los MVA.....	71
Tabla 3.2.2 Falla No. 2. Método de los MVA.....	72
Tabla 3.2.3 Falla No. 3. Método de los MVA.....	72
Tabla 3.2.4 Falla No. 4. Método de los MVA.....	73
Tabla 3.2.5 Falla No. 5. Método de los MVA.....	73
Tabla 3.2.6 Falla No. 6. Método de los MVA.....	74
Tabla 3.2.7 Falla No. 7. Método de los MVA.....	74
Tabla 3.2.8 Falla No. 8. Método de los MVA.....	75
Tabla 3.2.9 Potencia simétrica y asimétrica. Método de los MVA.....	76
Tabla 3.2.10 Potencia simétrica y asimétrica. Método de Thévenin y MVA	77
Tabla 3.3.1 Valores de reactancias equivalentes en conductores eléctricos	80
Tabla 3.3.2 Valores instalados en el área calderas.....	83
Tabla 3.3.3 Valores instalados en el circuito bbas. de agua	83
Tabla 3.3.4 Valores instalados en el circuito bbas. de petróleo.....	84
Tabla 3.3.5 Valores instalados en el ccm1. Calderas.....	85
Tabla 3.3.6 Valores instalados en el ccm 2. Calderas.....	85
Tabla 3.3.7 Valores instalados en el ccm 1. Bbas de agua.....	87
Tabla 3.3.8 Valores instalados en el ccm 1. Bbas de petróleo	88
Tabla 3.3.9 Valores instalados en el circuito secado y envase	89

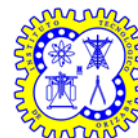
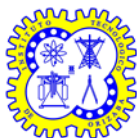


Tabla 3.3.10 Valores instalados en el circuito Batey-Molinos.....	89
Tabla 3.3.11 Valores instalados en el circuito Clarificación-Evaporación.....	90
Tabla 3.3.12 Valores instalados en el ccm 1. Secado y envase.....	91
Tabla 3.3.13 Valores instalados en el ccm 1. Batey-Molinos	92
Tabla 3.3.14 Valores instalados en el ccm 2. Batey-Molinos	92
Tabla 3.3.15 Valores instalados en el ccm 3. Batey-Molinos	93
Tabla 3.3.16 Valores instalados en el ccm 4. Batey-Molinos	94
Tabla 3.3.17 Valores instalados en el ccm 1. Clarificación-Evaporación	95
Tabla 3.3.18 Valores instalados en el ccm 2. Clarificación-Evaporación	95
Tabla 3.3.19 Valores instalados en el ccm 3. Clarificación-Evaporación	96
Tabla 3.3.20 Valores instalados en el ccm 4. Clarificación-Evaporación	97
Tabla 3.3.21 Valores instalados en el ccm 5. Clarificación-Evaporación	97
Tabla 3.3.22 Valores instalados en el circuito oficinas administrativas	98
Tabla 3.3.23 Valores instalados en el circuito cristalización.....	99
Tabla 3.3.24 Valores instalados en el circuito bombas de inyección.....	99
Tabla 3.3.25 Valores instalados en el circuito bombas de rechace.....	100
Tabla 3.3.26 Valores instalados en el ccm 1. Oficinas administrativas	101
Tabla 3.3.27 Valores instalados en el ccm 2. Oficinas administrativas	101
Tabla 3.3.28 Valores instalados en el ccm 1. Cristalización.....	102
Tabla 3.3.29 Valores instalados en el ccm 2. Cristalización.....	103
Tabla 3.3.30 Valores instalados en el ccm 1. Bombas de inyección	104
Tabla 3.3.31 Valores instalados en el ccm 1. Bombas de rechace	105
Tabla 3.3.32 Valores instalados en el circuito centrífugas de B y C.....	106
Tabla 3.3.33 Valores instalados en el circuito centrífugas de A	106
Tabla 3.3.34 Valores instalados en el ccm 1. Centrífugas de B y C.....	107
Tabla 3.3.35 Valores instalados en el ccm 1. Centrífugas de A	108
Tabla 3.3.36 Valores instalados en el ccm 2. Centrífugas de A	109
Tabla 3.3.37 Valores instalados en el circuito molino 1.....	110
Tabla 3.3.38 Valores instalados en el ccm 1 Molino 1	110

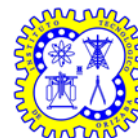
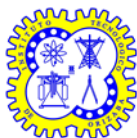


Tabla 3.3.39 Valores instalados en el ccm 2. Molino 1	111
Tabla 3.3.40 Valores instalados en el circuito molino 6.....	112
Tabla 3.3.41 Valores instalados en el ccm 1. Molino 6	112
Tabla 3.3.42 Valores instalados en el circuito bomba sultzer.....	113
Tabla 3.3.43 Valores instalados en el ccm 1. Bomba sultzer	113

CAPÍTULO IV

Tabla 4.2.1.1 Valores de cortocircuito. Calderas.....	114
Tabla 4.2.1.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito calderas	115
Tabla 4.2.1.1.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Calderas	116
Tabla 4.2.1.1.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 1.Calderas	116
Tabla 4.2.1.2.1 Valores de cortocircuito ccm 2. Calderas	117
Tabla 4.2.1.2.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 2.Calderas	117
Tabla 4.2.2.1 Valores de cortocircuito. Bombas de petróleo	118
Tabla 4.2.2.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de petróleo	118
Tabla 4.2.3.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Bombas de petróleo.....	119
Tabla 4.2.3.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 1.Bbas de petróleo.119	
Tabla 4.2.4.1 Valores de cortocircuito.Bombas de agua	120
Tabla 4.2.4.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de agua	120
Tabla 4.2.4.3 Valores del interruptor requerido.Bbas de agua	121
Tabla 4.3.1.1 Valores de cortocircuito. Batey-Molinos	122
Tabla 4.3.1.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito Batey-Molinos ..	122
Tabla 4.3.1.3 Valores del interruptor requerido.Batey-Molinos.....	123
Tabla 4.3.1.1.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Batey-Molinos	123
Tabla 4.3.1.1.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 1.Batey-Molinos..	124
Tabla 4.3.1.1.3 Valores del interruptor requerido ccm 1. Batey-Molinos	124
Tabla 4.3.1.2.1 Valores de cortocircuito ccm 2.Batey-Molinos	125

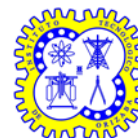
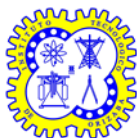


Tabla 4.3.1.2.2 Valores del interruptor requerido ccm 2. Batey-Molinos	125
Tabla 4.3.1.3.1 Valores de cortocircuito ccm 3. Batey-Molinos	126
Tabla 4.3.1.3.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 3. Batey-Molinos .	126
Tabla 4.3.1.4.1 Valores de cortocircuito ccm 4.Batey-Molinos	127
Tabla 4.3.1.4.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 4. Batey-Molinos .	127
Tabla 4.3.2.1 Valores de cortocircuito.Clarificación-Evaporación.....	128
Tabla 4.3.2.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito Clarificación-Evaporación	128
Tabla 4.3.2.1.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Clarificación-Evaporación	129
Tabla 4.3.2.1.2 Valores del interruptor requerido ccm 1. Clarificación-Evaporación.	129
Tabla 4.3.2.2.1 Valores de cortocircuito ccm 2. Clarificación-Evaporación	130
Tabla 4.3.2.2.2 Valores correspondientes al interruptor del ccm 2. Clarificación-Evaporación.	130
Tabla 4.3.2.2.3 Valores del interruptor requerido ccm 2. Clarificación-Evaporación.	131
Tabla 4.3.2.3.1 Valores de cortocircuito ccm 3. Clarificación-Evaporación.....	131
Tabla 4.3.2.3.2 Valores del interruptor requerido ccm 3. Clarificación-Evaporación	132
Tabla 4.3.2.4.1 Valores de cortocircuito ccm 4.Clarificación-Evaporación	132
Tabla 4.3.2.4.2 Valores del interruptor ccm 4. Clarificación-Evaporación.	133
Tabla 4.3.2.5.1 Valores de cortocircuito ccm 5. Clarificación-Evaporación.....	133
Tabla 4.3.2.5.2 Valores del interruptor requerido ccm 5. Clarificación-Evaporación	134
Tabla 4.3.3.1 Valores de cortocircuito. Manejo de azúcar.....	134
Tabla 4.3.3.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito manejo de azúcar	135
Tabla 4.3.3.3 Valores correspondientes al ccm 1. Manejo de azúcar	135
Tabla 4.4.1.1 Valores de cortocircuito. Oficinas administrativas	136
Tabla 4.4.1.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito oficinas administrativas	136

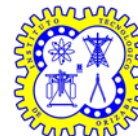
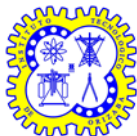
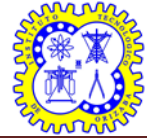
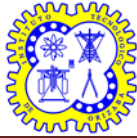


Tabla 4.4.1.1.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Oficinas administrativas	137
Tabla 4.4.1.1.2 Valores del interruptor requerido ccm 1. Oficinas administrativas ..	137
Tabla 4.4.1.2.1 Valores de cortocircuito ccm 2. Oficinas administrativas	138
Tabla 4.4.1.2.2 Valores del interruptor requerido ccm 2. Oficinas administrativas .	138
Tabla 4.4.2.1 Valores de cortocircuito.Circuito cristalización.....	139
Tabla 4.4.2.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito cristalización ..	139
Tabla 4.4.2.1.1 Valores de cortocircuito ccm 1. Cristalización.	140
Tabla 4.4.2.1.2 Valores del interruptor requerido ccm 1.Cristalización	140
Tabla 4.4.2.2.1 Valores de cortocircuito ccm 2.Cristalización	141
Tabla 4.4.2.2.2 Valores del interruptor requerido ccm 2. Cristalización	141
Tabla 4.4.3.1 Valores de cortocircuito. Circuito bombas de inyección	142
Tabla 4.4.3.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de inyección	142
Tabla 4.4.3.3 Interruptor requerido ccm 1. Bbas. de inyección	143
Tabla 4.4.4.1 Valores de cortocircuito. Circuito bombas de rechace.....	143
Tabla 4.4.4.2 Valores correspondientes al interruptor del circuito bbas de rechace	144
Tabla 4.4.4.3 Valores del interruptor requerido ccm 1. Bbas de rechace	144



INTRODUCCIÓN:

Debido al constante crecimiento en el ámbito industrial es de vital importancia contar con instalaciones eléctricas bien diseñadas y con la protección adecuada, esto con el fin de obtener resultados benéficos para la misma.

El interruptor de potencia es un dispositivo que se encarga de conectar y desconectar circuitos eléctricos bajo condiciones normales o de falla.

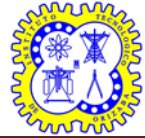
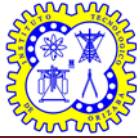
Para lograr que el interruptor cumpla con la función para la cual fue diseñado es necesario contar con información veraz y actualizada sobre la corriente de cortocircuito existente, para así evitar daños en los equipos eléctricos, ya que la mayoría de las veces estos no cuentan con protecciones adecuadas.

Este gran problema se vio reflejado en Central Motzorongo, debido a que en años recientes hubo un significativo incremento en la producción, lo que trajo consigo una mayor demanda de energía eléctrica, y al mismo tiempo diversos problemas con las protecciones de los equipos eléctricos, ya que estas no eran capaces de soportar la nueva demanda de energía.

Consientes de esto, Central Motzorongo tomo la decisión de realizar un nuevo análisis de cortocircuito, con la finalidad de optimizar el funcionamiento de los equipos, al contar con las protecciones adecuadas. Lo cual indudablemente trae consigo beneficios en la producción.

Este trabajo expone de manera simplificada el análisis mencionado anteriormente, describiendo previamente las protecciones utilizadas en los equipos eléctricos, con el fin de lograr una mayor comprensión del tema.

Se incluyen también, recomendaciones acerca de las protecciones próximas a rebasar su capacidad nominal, basándose en los valores obtenidos.



JUSTIFICACIÓN:

La idea de realizar un nuevo análisis de cortocircuito en central Motzorongo surgió a raíz de las constantes fallas que se presentaban en los equipos eléctricos, debidas en su mayoría a una mala calibración en sus protecciones.

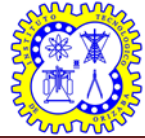
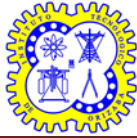
Durante años, diversos equipos, en su mayoría motores eléctricos, resultaron dañados, debido a que sus protecciones no cumplían con los requerimientos necesarios. Este problema surgió a raíz del incremento constante de producción, ya que la mayoría de estos al presentar daños eran sustituidos sin tomar en cuenta si la protección con la que contaban era la adecuada para el equipo entrante, esto redundaba en equipos con protecciones inadecuadas. Finalmente, estos equipos también resultaban dañados después de cierto tiempo de estar en funcionamiento por la misma razón.

Debido a esto, el equipo de trabajo de Central Motzorongo tomo la decisión de recabar la información necesaria, a fin de optimizar el funcionamiento de los equipos eléctricos y evitar daños en los mismos.

Para recabar la información necesaria se realizó un inventario de toda la fábrica, tomando los datos pertinentes de cada equipo dentro de las diversas áreas que se encuentran dentro de la misma.

Con toda la información obtenida, se determinó realizar un nuevo cálculo de corto circuito, con la finalidad de erradicar las constantes fallas en los equipos.

Los resultados obtenidos se exponen en el presente trabajo, el cual es producto de un gran trabajo en equipo.

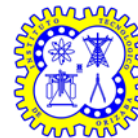
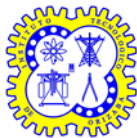


OBJETIVO GENERAL:

El análisis de cortocircuito tiene por objetivo optimizar el funcionamiento de los equipos eléctricos, al contar estos con sus protecciones adecuadas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ❖ Contar con información veraz y actualizada de los equipos instalados en Central Motzorongo.
- ❖ Conocer la aportación de cortocircuito de los diversos elementos instalados en Central Motzorongo.
- ❖ Proporcionar las protecciones adecuadas a los equipos eléctricos.
- ❖ Mejorar el proceso de producción.



MARCO TEÓRICO:

El constante desarrollo industrial está directamente relacionado con el dominio de la energía eléctrica, ya que es la herramienta principal que utiliza el hombre para desempeñar sus funciones. Este desarrollo exige un suministro de energía confiable, que cuente con un sistema de protecciones que detecte de manera oportuna una situación anormal.

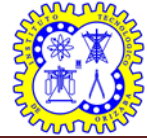
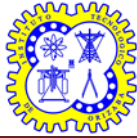
El interruptor eléctrico es el dispositivo de protección encargado de desconectar una carga o una parte del sistema eléctrico, tanto en condiciones de operación normal como en condiciones de falla.

Los dispositivos de protección generalmente utilizados en un sistema eléctrico industrial son los interruptores termomagnéticos, interruptores electromagnéticos, relevadores de sobrecarga y fusibles. Cada uno de estos dispositivos es utilizado para resguardar a los equipos que conforman el sistema industrial, entre los que se encuentran generadores, transformadores y motores.

La combinación adecuada de estos dispositivos lleva por nombre coordinación de protecciones, la cual consiste en ajustar los diversos dispositivos, con la finalidad de que estos sean selectivos, es decir que solo debe operar el dispositivo de protección que se encuentre más cerca de la falla, si por algún motivo el dispositivo no opera, entonces debe de operar el siguiente. Para poder logra una operación selectiva es necesario que los dispositivos cuenten con las características interruptivas apropiadas.

Si esto no ocurre, el sistema eléctrico puede resultar seriamente dañado por la presencia de fallas, llamadas comúnmente cortocircuitos.

Un cortocircuito se define como una conexión de baja impedancia entre dos o más puntos entre los que existe una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente de magnitud elevada.



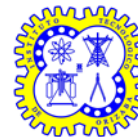
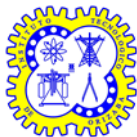
Dichas corrientes producen esfuerzos térmicos y electrodinámicos en los diversos elementos que constituyen la instalación, provocándoles daños si estas no son eliminadas rápidamente.

Debido a los daños que produce es de vital importancia el tener conocimiento de las mismas en los distintos puntos de la instalación, esto con la finalidad de contar con dispositivos que limiten su capacidad de manera oportuna.

El cortocircuito trifásico y el de línea a tierra son los principales causantes de fallas en un sistema eléctrico industrial; siendo las principales fuentes de cortocircuito la compañía suministradora, las maquinas síncronas y los motores de inducción.

El sistema eléctrico de Central Motzorongo se vio afectado por las corrientes anteriormente expuestas, por tal motivo se decidió realizar un nuevo cálculo de cortocircuito para poder seleccionar las protecciones adecuadas de los diversos equipos.

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos, describiendo previamente las protecciones utilizadas comúnmente en un sistema eléctrico, posteriormente se describe el análisis realizado y finalmente en el capítulo IV se presenta la optimización de protecciones realizada con los valores obtenidos.



CAPÍTULO I

PROTECCIÓN A SISTEMAS ELÉCTRICOS.

1.1 GENERALIDADES:

Cualquier sistema eléctrico se encuentra expuesto a diversas fallas, debido a esto se implementa el uso de los interruptores.

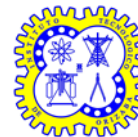
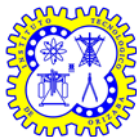
Los interruptores son un medio para abrir o cerrar un circuito eléctrico tanto en condiciones normales como en condiciones de falla. Cuando ocurre esta última es inevitable la presencia del arco eléctrico, el cual representa una condición desfavorable en los equipos.

El arco eléctrico se genera debido a la ionización del medio entre los contactos, haciéndolo conductor, lo cual facilita la circulación de corriente.

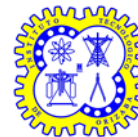
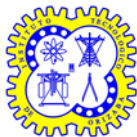
Las características que definen la magnitud del arco eléctrico se enlistan a continuación.

- La naturaleza y presión del medio ambiente en donde se induce.
- La presencia de agentes ionizantes.
- La tensión entre los contactos y su variación en el tiempo.
- El sistema de extinción del mismo.

Este sistema de extinción varía de acuerdo a las características de construcción de los interruptores. Los cuales presentan diversos parámetros que se deben considerar para una correcta selección de los mismos, los más significativos se enlistan a continuación:



- Tensión nominal.
Es el valor eficaz de la tensión entre fases del sistema en que se instala el interruptor.
- Tensión máxima:
Es el valor máximo de la tensión para la cual está diseñado el interruptor y representa el límite superior de la tensión, al cual debe operar según norma.
- Corriente nominal:
Es el valor eficaz de la corriente normal máxima que puede circular continuamente a través del interruptor sin exceder los límites recomendables de elevación de temperatura.
- Corriente de cortocircuito inicial:
Es el valor pico de la primera semionda de corriente, comprendida en ella la corriente transitoria.
- Corriente de cortocircuito:
Es el valor eficaz de la corriente máxima de cortocircuito que puede abrir la cámara de extinción de arco.
- Tensión de restablecimiento:
Es el valor eficaz de la tensión máxima de la primera semionda de corriente alterna, que aparece entre los contactos del interruptor después de la extinción de la corriente.



- Cámara de extinción del arco:

Es la parte principal de cualquier interruptor eléctrico, en donde al abrir los contactos la energía circulante se convierte en calor. Estas cámaras deben soportar los esfuerzos electrodinámicos de la corriente de cortocircuito.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN:

Las características que debe tener cualquier dispositivo de protección para considerarse apto para realizar la función asignada son las siguientes:

1.2.1 CONFIABILIDAD:

La confiabilidad del sistema de protección es su habilidad para no tener operaciones incorrectas y es función de la dependabilidad y la seguridad.

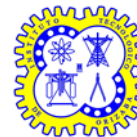
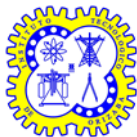
Dependabilidad es la certeza para la operación correcta de la protección en respuesta a un problema del sistema (probabilidad de no tener una falla de operación cuando se le requiere), es decir que corresponde a la correcta operación de una protección para todas las fallas que ocurran dentro de su zona de protección.

La seguridad es la habilidad del sistema para evitar la incorrecta operación con o sin fallas (habilidad para no tener una operación indeseada o no requerida), es decir la estabilidad que debe mantener una protección bajo condiciones normales o ante la presencia de fallas fuera de su zona de protección.

Un sistema de protección debe comportarse correctamente bajo cualquier condición tanto del sistema eléctrico como del entorno.

1.2.2 ECONOMÍA:

Un dispositivo de protección que tiene una zona de influencia perfectamente definida, provee una mejor selectividad, pero generalmente su costo es mayor. Los dispositivos de protección de alta velocidad ofrecen una mayor continuidad del



servicio al reducir los daños provocados por una falla y los riesgos al personal, por tanto tienen un costo inicial mayor.

Sin embargo, el más alto desempeño y costo no siempre están justificados, por lo que generalmente se combinan tanto dispositivos de baja como de alta velocidad para proteger a los equipos eléctricos.

1.2.3 SELECTIVIDAD:

Un sistema de protección es diseñado por zonas, las cuales deben cubrir completamente al sistema eléctrico sin dejar porciones desprotegidas. Cuando una falla ocurre, se requiere que la protección sea capaz de seleccionar y disparar únicamente los dispositivos de protección adyacentes a la falla. Esta propiedad de acción selectiva es también llamada discriminación.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERRUPTORES:

La clasificación de los interruptores se hace de acuerdo a sus características constructivas, es decir de acuerdo a la forma en que estos eliminan la presencia del arco eléctrico. Esta clasificación se muestra en la figura 1.3.1

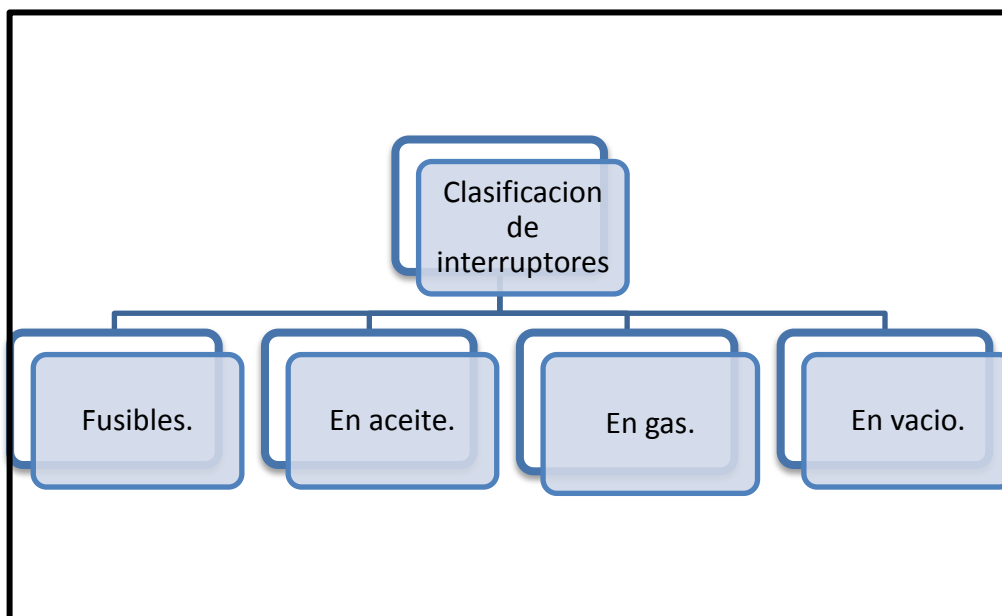
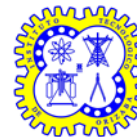
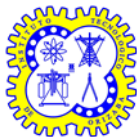


Imagen 1.3. 1

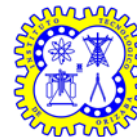
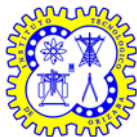
Clasificación de los interruptores.

Para poder entender la función de estos dispositivos, se presenta una breve descripción de los mismos, explicando su principio de funcionamiento, así como sus principales características.

1.3.1 FUSIBLES:

Un fusible es un dispositivo empleado para proteger un circuito eléctrico mediante la fusión de uno o varios elementos destinados para este efecto, interrumpiendo el flujo de la corriente eléctrica cuando esta sobrepasa el valor de la corriente de fusión del elemento dentro de un tiempo determinado.

La parte que sirve como elemento de protección para la desconexión del cortocircuito es el elemento fusible, el cual se construye de una sección transversal determinada hecha de una aleación metálica, que tiene como función principal fundirse al paso de una magnitud de corriente superior para la que fue diseñado.



Las características que se utilizan para elegir estos dispositivos se enlistan a continuación:

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

La siguiente figura muestra un cortacircuito fusible, así como sus componentes.

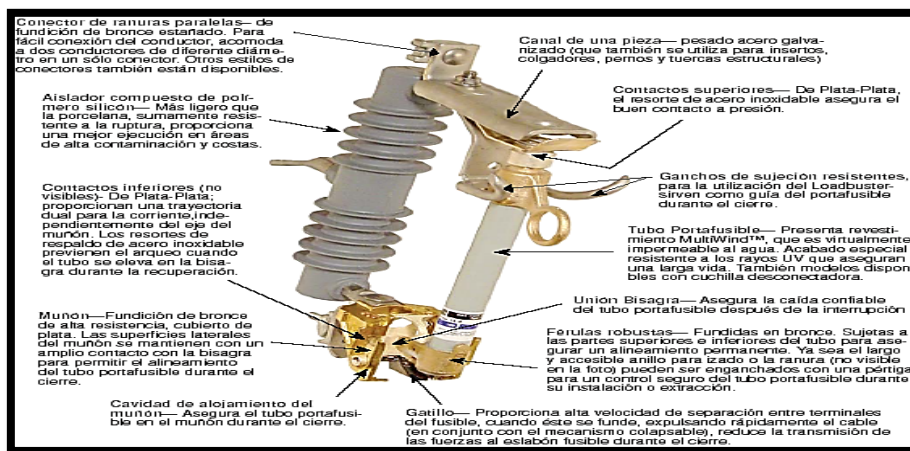


Imagen 1.3.1. 1

Componentes de un cortacircuito fusible.

1.3.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FUSIBLES:

La siguiente figura muestra la clasificación de los fusibles de acuerdo a su tipo de operación, su velocidad de respuesta y su capacidad interruptiva.

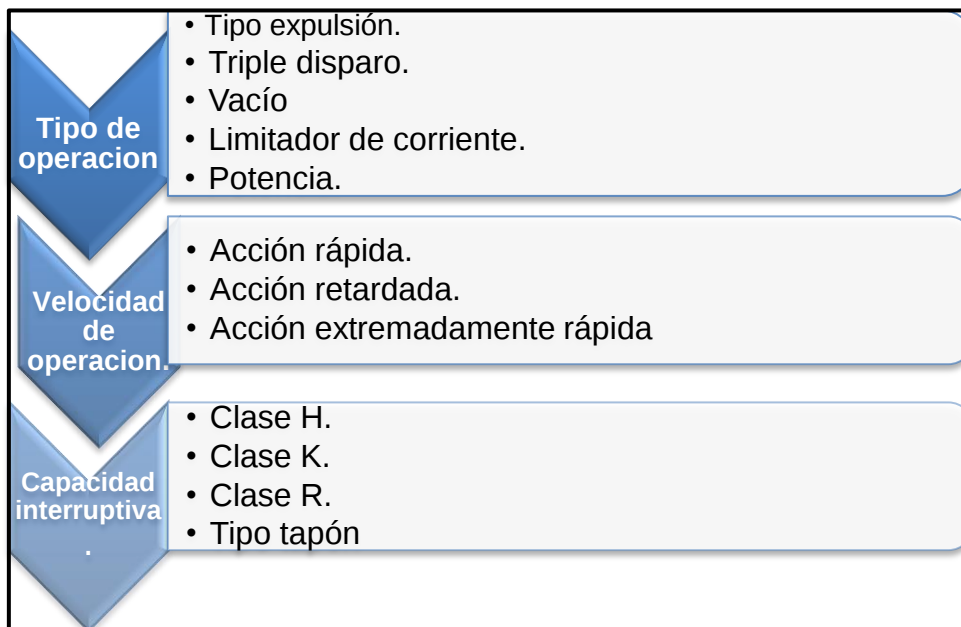
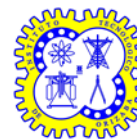
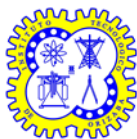


Imagen 1.3.1.1. 1

Clasificación de los fusibles.

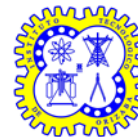
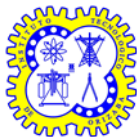
1.3.1.1.1 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE OPERACIÓN:

Debido a la diversidad existente de elementos fusibles es conveniente realizar una revisión minuciosa, con la finalidad de elegir el elemento que cubra las características requeridas para su operación.

❖ FUSIBLES TIPO EXPULSIÓN:

La siguiente clasificación describe las características de los fusibles de acuerdo a su capacidad de operación.

- Tipo N: El elemento que pertenece a esta categoría debe llevar el 100% de la corriente nominal continuamente y deberá fundirse a no menos del 230 % de la corriente nominal.



- Tipo K y T: Estos fusibles deben ser capaces de llevar el 150% de su capacidad nominal para fusibles de estaño y del 100% para fusibles de plata.

❖ FUSIBLES DE TRIPLE DISPARO:

Los fusibles de doble y triple disparo constan de dos o tres cortacircuitos fusibles por fase, los cuales se conectan a la fuente mediante una barra común y la salida se conecta al primer cortacircuito fusible, al momento de detectar una corriente mayor a la corriente de operación se funde el elemento del primer fusible, abriendo el primer portafusible y cerrando en ese momento el siguiente cortacircuito fusible, en caso de persistir la sobrecorriente operara en forma similar al anterior conectando el siguiente cortacircuito fusible con la carga.

❖ FUSIBLES EN VACÍO:

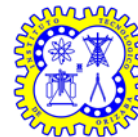
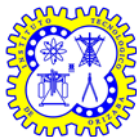
El fusible en vacío, como su nombre lo indica está encerrado en una cámara de vacío, que cuenta con una cámara de arqueo, un escudo o pantalla y un aislamiento cerámico.

Para corrientes de falla baja, estos fusibles necesitan algunos ciclos para lograr la fusión del elemento fusible.

Para corrientes altas el elemento se funde instantáneamente y forma un arco eléctrico mantenido por el plasma, la diferencia de presión comparada con el vacío acelera la vaporización del metal y la extinción del arco.

❖ FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE:

Este tipo de fusible limita la corriente cuando ocurre un cortocircuito, esto permite que se reduzcan considerablemente los daños en el equipo que se encuentra protegiendo.



Existen 3 tipos de fusibles limitadores de corriente, los cuales son:

- De respaldo o intervalo parcial:

Este tipo de fusible debe de ser usado en conjunto con un fusible de expulsión o algún otro dispositivo de protección.

- De propósito general:

Este tipo de fusible está diseñado para interrumpir todas las corrientes de falla. Para corrientes de valor bajo, el tiempo de operación es retardado, para corrientes de falla elevadas opera en un tiempo aproximado de un cuarto de ciclo.

- De intervalo completo:

Este dispositivo interrumpe cualquier corriente que se encuentre por encima de la corriente nominal de manera continua.

❖ FUSIBLES DE POTENCIA:

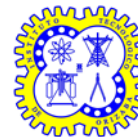
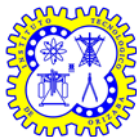
Este tipo de fusibles está diseñado para instalarse en subestaciones, líneas de distribución y subtransmisión, en donde los requerimientos de capacidad interruptiva son mayores.

De acuerdo a su construcción, los fusibles de potencia pueden ser de tipo expulsión y de ácido bórico, siendo estos últimos los que cuentan con mejores características.

1.3.1.1.2 CLASIFICACIÓN POR VELOCIDAD DE OPERACIÓN.

❖ FUSIBLES DE ACCIÓN RÁPIDA:

Los fusibles de acción rápida (de operación normal) cuentan con un tiempo de apertura entre 0.05 s y 2s. Estos elementos se accionan con el 500%(aproximado) del valor de la corriente nominal.



❖ FUSIBLES DE ACCIÓN RETARDADA:

De acuerdo a sus características, este tipo de fusibles abre el circuito en una condición de falla en un periodo de tiempo de menos de medio ciclo. Comparado con los fusibles de acción rápida, los fusibles de acción retardada se accionan con valores más cercanos a la corriente de operación de los circuitos.

❖ FUSIBLES DE ACCIÓN EXTREMADAMENTE RÁPIDA:

Este tipo de fusibles encuentra su principal aplicación en la protección de componentes electrónicos de estado sólido, tales como semiconductores (diodos, tiristores, etc.)

Este tipo de protecciones se seleccionan para valores de sobrecarga bajos.

1.3.1.1.3 CLASIFICACIÓN POR CAPACIDAD INTERRUPTIVA:

La capacidad de interrupción de un fusible es la intensidad de corriente máxima que puede soportar adecuadamente el fusible para proteger a los componentes del sistema eléctrico.

Una clasificación general de acuerdo a la capacidad interruptiva de los fusibles se muestra en la siguiente tabla.

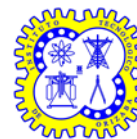
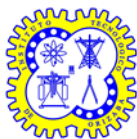


Tabla 1.3.1.1.3. 1

Capacidad interruptiva de los fusibles.

FUSIBLE	CAPACIDAD INTERRUPTIVA (kA)
Clase H	10
Clase K	50, 100 o 200
Clase RK-1 y Clase RK-5	200
Clase J, Clase CC, Clase T y Clase L.	200
Clase G	100
Fusibles tipo tapón.	10

1.3.2 INTERRUPTORES EN ACEITE:

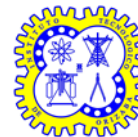
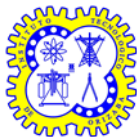
Estos interruptores fueron utilizados al inicio del desarrollo industrial para la extinción del arco eléctrico.

La función principal del aceite en el interruptor es la de aislar las partes vivas de tierra y producir hidrogeno, el cual tiene la función de enfriar y comprimir el arco.

El aceite es creado a base de petróleo, el cual es refinado para evitar la formación de lodos y corrosión debido al contenido de azufre y otras impurezas.

La característica principal del aceite utilizado en estos interruptores es su alta rigidez dieléctrica y una alta capacidad térmica.

En su forma básica, estos interruptores constan de un recipiente de acero lleno de aceite, en el cual se encuentran alojados los contactos fijos y móviles, y un dispositivo que se encarga de abrir o cerrar dichos contactos.



El tiempo de extinción en este tipo de interruptores es de aproximadamente $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de ciclo.

La siguiente imagen, presenta de manera ilustrativa los componentes principales del interruptor en aceite.

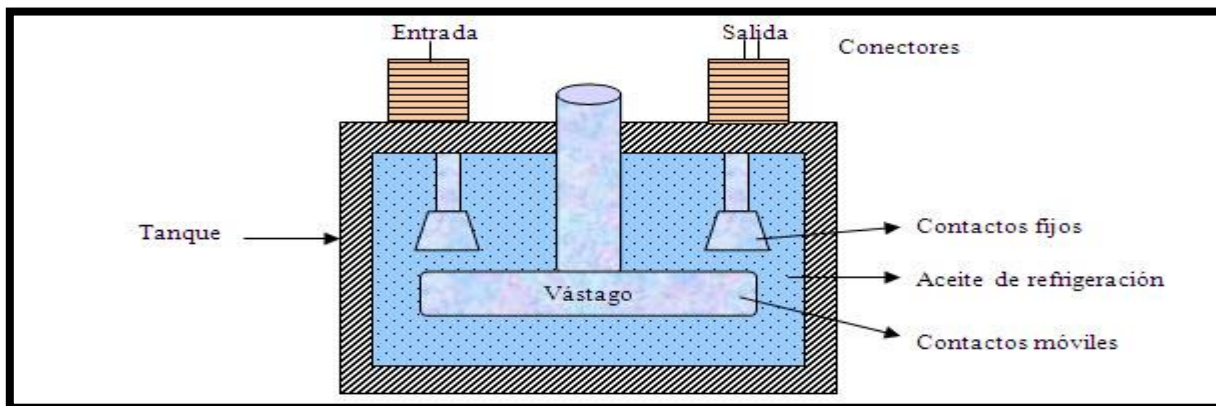


Imagen 1.3.2. 1

Componentes del interruptor de aceite.

A su vez, los interruptores en aceite se dividen en 2 grandes grupos, presentados a continuación:

- Interruptores en gran volumen de aceite.
- Interruptores en pequeño volumen de aceite.

Estos interruptores tienen el mismo principio de funcionamiento, la característica que distingue a uno de otro es principalmente la cantidad de aceite utilizado.

La tabla siguiente muestra las principales ventajas y desventajas de los 2 tipos de interruptores mencionados anteriormente.

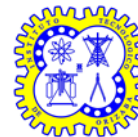
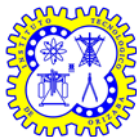
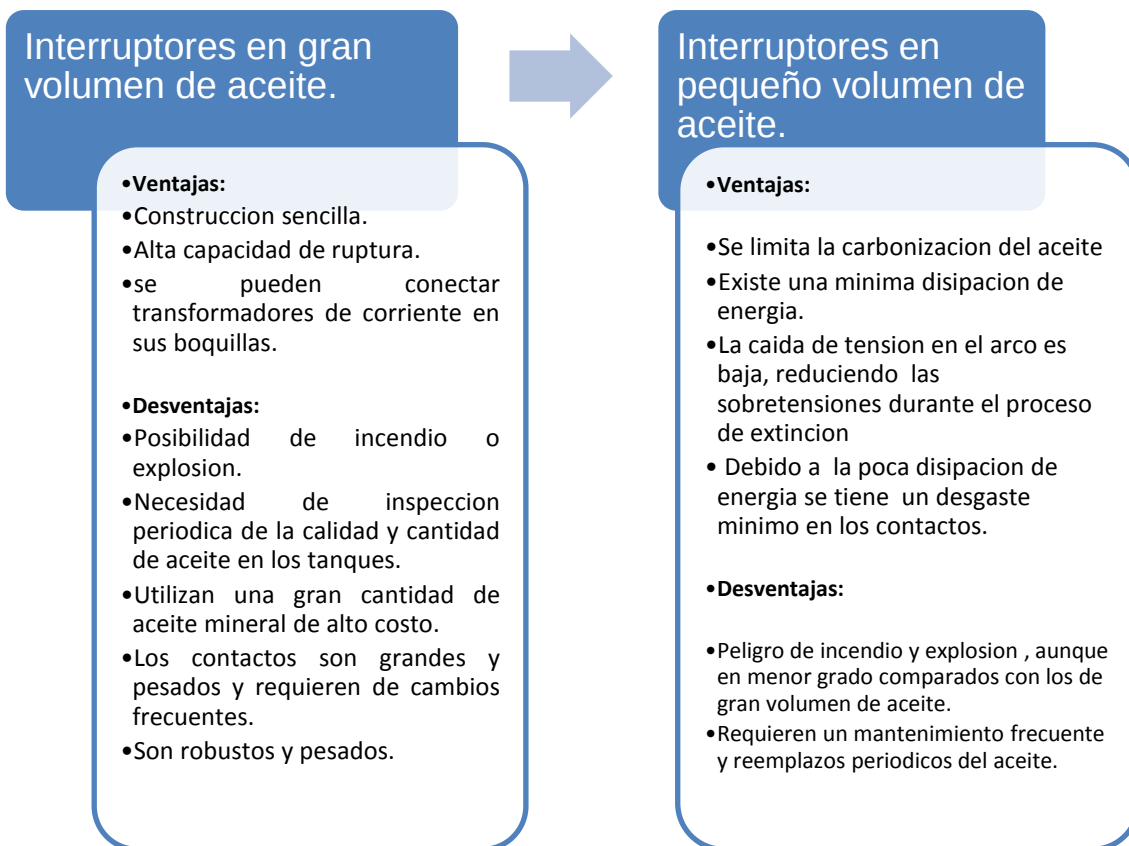


Tabla 1.3.2. 1

Ventajas y desventajas de interruptores en aceite.

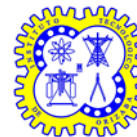
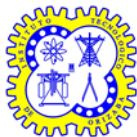


1.3.3 INTERRUPTORES EN GAS (SF₆):

El constante incremento de demanda en los sistemas eléctricos exige interruptores con capacidades cada vez más elevadas.

Debido a esto, se ha implementado en los últimos años el uso de interruptores en gas, específicamente interruptores en sf₆ (hexafloruro de azufre).

Este elemento es un compuesto que sirve como medio de extinción del arco eléctrico.



Sus principales características son:

- Presenta una alta rigidez dieléctrica.
- Tiene estabilidad térmica.
- No es flamable.
- Tiene una alta conductividad térmica.

El hexafluoruro de azufre tiene la capacidad de capturar electrones libres y formar iones negativos (comportamiento electronegativo), lo que ocasiona la rápida recuperación de la resistencia dieléctrica del canal del arco, posterior a la extinción del mismo. El cual logra ser extinguido rápidamente debido a la alta conductividad térmica del SF_6 , que permite un enfriamiento y desionización rápida del arco.

Los interruptores en SF_6 trabajan a bajos niveles de presión, y solamente al operar se aumenta la presión en el área cercana al arco, en la llamada cámara de interrupción.

Estos interruptores están diseñados para operar a magnitudes elevadas; en estos casos es preferible colocar varias cámaras de interrupción en serie, para lograr una mejor operación.

La siguiente imagen muestra el principio de funcionamiento de este tipo de interruptores.

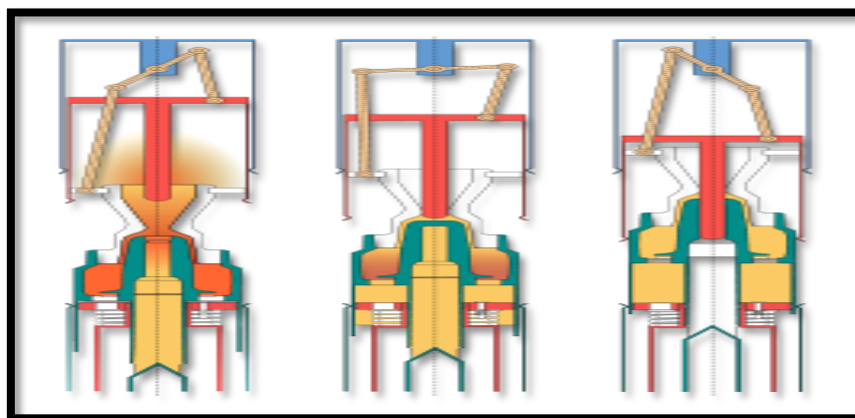
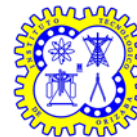
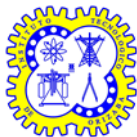


Imagen 1.3.3. 1

Principio de funcionamiento de interruptores en sf_6 .

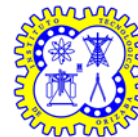
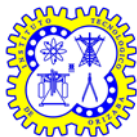
De la imagen anterior, durante el proceso de apertura el arco generado entre los contactos se alarga mientras estos se separan y el gas SF_6 que se encuentra en el interior de la cámara de extinción es proyectado hacia el arco eléctrico, lo que genera que este se enfríe y se interrumpa, quedando restablecido el dieléctrico, evitando con esto el reencendido del arco.

Algunas de las principales ventajas y desventajas de este elemento se enlistan a continuación:

- Después de la apertura de los contactos los gases ionizados no tienen contacto con el aire.
- La interrupción no produce ruido, comparado con los demás interruptores.
- Presenta alta rigidez dieléctrica.
- El tiempo de extinción del arco es mínimo.

Desventajas:

- Debido a que el gas es incoloro, inodoro e insípido se debe tener cuidado de que no existan fugas.



- Requiere de equipo especial para realizar la inspección de fugas.
- Los productos del arco son tóxicos y combinados con la humedad producen ácido fluorhídrico, que daña la porcelana y el cemento de sellado alojado en las boquillas.
- Tiene un alto costo inicial.

1.3.4 INTERRUPTORES EN VACÍO:

Se denomina vacío al lugar en donde la presión que se mide es menor que la presión atmosférica normal.

Existen diferentes clases de vacío, entre los que se encuentran el vacío grueso o primario, medio, alto y ultra alto, y en cada caso la presión es cada vez menor (es decir, el vacío es cada vez más alto).

La rigidez dieléctrica que se presenta en vacío representa una alternativa para la extinción del arco eléctrico.

En los interruptores en vacío, el arco eléctrico se presenta por la vaporización del material de los contactos, como consecuencia de las altas temperaturas que se concentran en los mismos y la presencia del alto vacío de la cámara. Al cruce por cero de la señal se condensa la mayor parte del vapor en los contactos.

En este tipo de interruptores, los contactos son alojados en una cámara de vacío de 10^{-4} - 10^{-9} bar. La alta capacidad dieléctrica del vacío permite una distancia entre los contactos de 6 a 25 mm.

Los interruptores en vacío se utilizan principalmente en voltajes de hasta 38 kV. Son compactos, no requieren mantenimiento y tienen larga vida de operación.

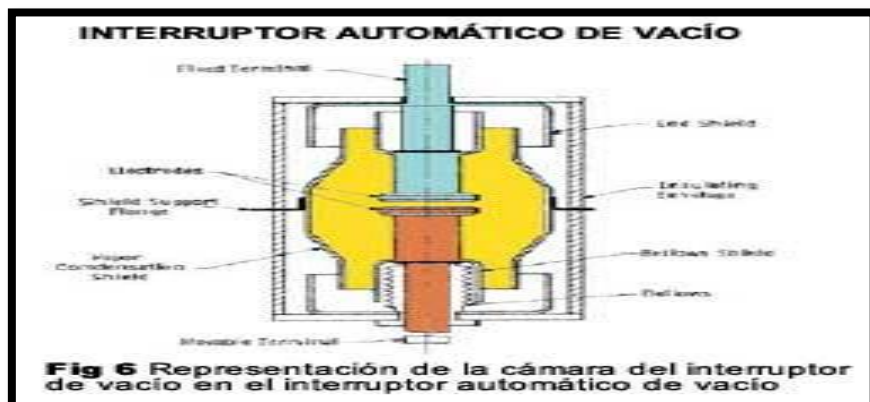
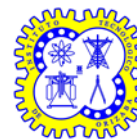
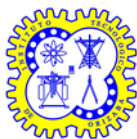


Imagen 1.3.4. 1

Componentes del interruptor en vacío.

La figura anterior muestra los componentes de un interruptor en vacío, en la cual se muestran dos contactos montados sobre una envoltura de la cual se ha expulsado aire, uno es el contacto fijo y el otro es llamado contacto móvil. La generación del arco se debe principalmente a la vaporización del material de los contactos, consecuencia de las altas temperaturas concentradas en algún punto de los contactos, y a la presencia del alto vacío en la cámara, al pase por cero de la corriente, la mayor parte del vapor se condensa, por lo cual la magnitud de la corriente de cortocircuito disminuye casi en su totalidad.



CAPÍTULO II

CORTOCIRCUITO.

2.1 INTRODUCCIÓN:

El cortocircuito se define como una conexión de baja resistencia o impedancia, entre dos o más puntos de un circuito que presentan una diferencia de potencial. Las corrientes generadas por este efecto se caracterizan por un incremento instantáneo y superior a la corriente nominal.

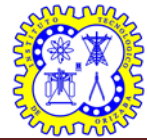
Las causas que generalmente originan un cortocircuito son:

- Deterioro o perforación del aislamiento, debido a calentamientos excesivos prolongados, ambiente corrosivo o envejecimiento natural.
- Problemas mecánicos, rotura de conductores o aisladores por objetos extraños, ramas de árboles en líneas aéreas e impactos en cables subterráneos.
- Sobretensiones debido a descargas atmosféricas, maniobras o a defectos.
- Factores humanos, falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.

Al mismo tiempo, estas corrientes de cortocircuito producen diversos efectos negativos en los equipos, los principales son:

- Efectos térmicos:

La corriente de magnitud elevada produce calentamientos en los conductores por el efecto Joule. En un cortocircuito, el calor producido eleva la temperatura del conductor, sin ceder calor al exterior, provocando la destrucción del mismo.



- Efectos electrodinámicos:

Las fuerzas de atracción y repulsión que aparecen entre conductores, por efecto del campo magnético creado a su alrededor por la corriente que los recorre, son directamente proporcionales al producto de esas corrientes e inversamente proporcionales a la distancia entre conductores. Las corrientes de cortocircuito, de valor elevado, hacen que esas fuerzas electrodinámicas sean también muy elevadas, provocando su destrucción.

Ahora bien, los efectos antes mencionados se presentan en mayor o menor proporción de acuerdo a la magnitud de las corrientes de cortocircuito, las cuales dependen principalmente de 2 factores, que son:

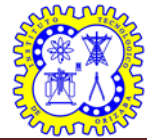
- Las características y el número de fuentes que alimentan al cortocircuito.
- La oposición o resistencia que presente el propio circuito de distribución.

En el ámbito industrial, un estudio de cortocircuito se realiza con la finalidad de obtener información sobre las corrientes y tensiones en un sistema eléctrico durante condiciones de falla, ya que esa información es requerida para determinar las características interruptivas.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO:

La corriente en régimen normal es una onda sinusoidal a 60 Hertz de frecuencia y amplitud constante, no así cuando ocurre un cortocircuito.

El proceso que ocurre en el sistema de potencia al producirse una falla causada por un cortocircuito es de carácter transitorio. En este caso, la forma de onda sigue teniendo una forma sinusoidal a 60 Hertz, pero va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario.



Para poder estudiar el sistema en estado estacionario se divide el periodo de ocurrencia de la falla en una serie sucesiva de intervalos, los cuales son llamados:

- Periodo subtransitorio.
- Periodo transitorio
- Periodo estacionario.

Estos periodos mencionados serán descritos más adelante, ya que tienen una estrecha relación con las maquinas rotativas, las cuales son las principales fuentes de cortocircuito dentro de un sistema eléctrico.

2.2 FUENTES DE CORTOCIRCUITO:

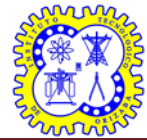
Cuando se determina la magnitud de la corriente de cortocircuito, es de vital importancia que se tomen en cuenta todas las fuentes de corriente de cortocircuito, y que las reactancias características de estas fuentes sean conocidas.

Existen cuatro fuentes básicas de corrientes de cortocircuito, que alimentan a la falla, estas son:

- Compañía suministradora de energía.
- Generadores.
- Motores síncronos.
- Motores de inducción.

2.2.1 COMPAÑÍA SUMINISTRADORA DE ENERGÍA:

Este sistema proporciona energía generalmente a través de transformadores reductores. Para poder realizar los cálculos de cortocircuito correspondientes, la compañía suministradora proporciona información sobre su corriente de cortocircuito.



2.2.2 GENERADORES:

Los generadores son movidos por turbinas, motores u otro tipo de fuerza motriz, cuando ocurre un cortocircuito en el circuito al cual está conectado el generador, este continúa generando tensión debido a que la excitación del campo se mantiene y la fuerza motriz sigue moviéndolo a velocidad normal.

La tensión generada produce una corriente de cortocircuito de gran magnitud, la cual fluye del generador (o generadores) al punto de falla, este flujo de corriente se limita únicamente por la impedancia del generador y el punto en donde ocurre la falla.

La reactancia del generador cambia respecto al tiempo después del inicio de la falla.

2.2.3 MOTORES SÍNCRONOS:

Este tipo de motores se comportan de manera similar a los generadores síncronos. Cuando ocurre un cortocircuito, el motor síncrono deja de tomar energía del sistema para continuar su rotación y empieza a disminuir su velocidad, pero la inercia de la carga tiende a evitar que este decremento se produzca de manera rápida.

De esta manera, la inercia actúa como un motor primario y debido a que la excitación se mantiene, el motor se comporta como un generador, suministrando corriente de cortocircuito durante varios ciclos después de que ocurre la falla.

La magnitud de la corriente de cortocircuito aportada por los motores síncronos depende de su capacidad en H.P., la tensión y su reactancia nominal, así como de la reactancia del sistema hasta el punto de falla.

2.2.4 MOTORES DE INDUCCIÓN:

Estos motores aportan corrientes de cortocircuito, cuando después de ocurrida la falla el motor continúa en movimiento debido a la inercia.

Sin embargo, existe una gran diferencia en la forma en la que contribuyen a la corriente de cortocircuito. Esto se debe a que el flujo de campo del motor de inducción se produce por la inducción del estator y no por el devanado de campo,



Debido a que este flujo disminuye rápidamente después de la falla, la aportación del motor de inducción disminuye con rapidez y desaparece en pocos ciclos.

La magnitud de la corriente de cortocircuito que aporta el motor de inducción depende de la potencia, tensión nominal y reactancia del motor, así como de la reactancia del sistema hacia el punto de falla.

Con la finalidad de dar un mayor entendimiento a los puntos anteriormente explicados, se presenta la siguiente imagen, en la que se muestran las diferentes formas de onda, pertenecientes a las fuentes de cortocircuito mencionadas.

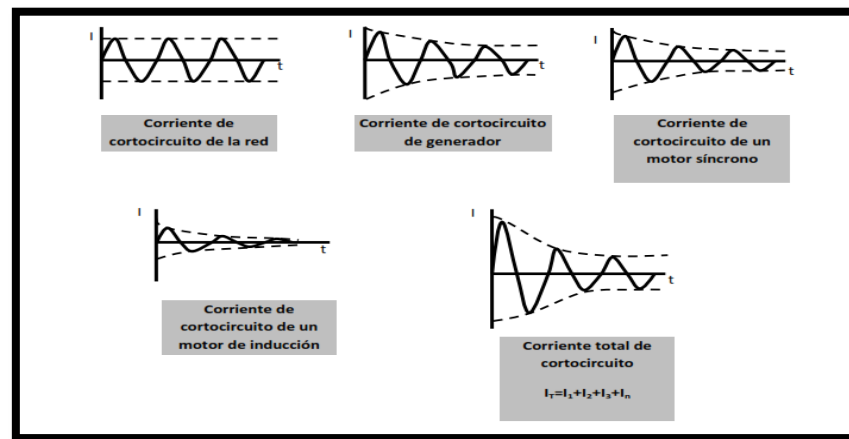
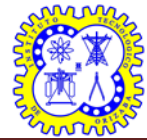


Imagen 2.2.4. 1

Formas de onda de las diferentes fuentes de cortocircuito.

2.3 COMPONENTES LIMITADORES DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO:

Durante un cortocircuito, las impedancias de los transformadores, los reactores, cables, barras conductoras y otras impedancias del circuito que se encuentren entre las fuentes de cortocircuito, son limitadores directos de la magnitud de las corrientes de falla.



A continuación se describen brevemente las características de las impedancias mencionadas en el párrafo anterior.

2.3.1 REACTANCIA DEL TRANSFORMADOR:

Anteriormente se consideraba a los transformadores como fuentes de cortocircuito, sin embargo esto es falso, ya que los transformadores cambian las magnitudes de tensión y corriente, mas no las generan.

La corriente de cortocircuito que proporciona un transformador depende de la relación de voltaje nominal en el lado secundario y de su porcentaje de reactancia.

El porciento de reactancia de un transformador es el porciento del voltaje nominal aplicado al primario del transformador para producir la corriente nominal total de carga en el secundario con cortocircuito. El porcentaje de reactancia es una medida porcentual de tensión, no una impedancia.

Debido a su reactancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de cortocircuito producidas por las fuentes a las cuales están conectados.

2.3.2 REACTORES:

Los reactores se utilizan para limitar las corrientes de cortocircuito mediante la inserción de una reactancia en el circuito. Sin embargo, los reactores tienen algunas desventajas, ya que producen caídas de tensión que pueden ser el motivo de disminuciones momentáneas de tensión en el sistema cuando ocurre una falla, o cuando se arrancan motores de gran capacidad.

2.3.3 CONDUCTORES:

Los conductores y barras conductoras son parte de la conexión entre las fuentes de corriente de cortocircuito y el punto de falla. Su impedancia natural limita la corriente de cortocircuito, esto depende principalmente de la naturaleza, calibre y longitud del conductor.



Los valores de resistencia, reactancia e impedancia de conductores y barras conductoras se encuentran en los catálogos de los fabricantes.

2.4 REACTANCIAS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS:

La reactancia de una máquina rotatoria es compleja y variable con el tiempo, por lo tanto la corriente de cortocircuito que se presenta en la misma es variable con el tiempo, tal como se muestra en la siguiente imagen.

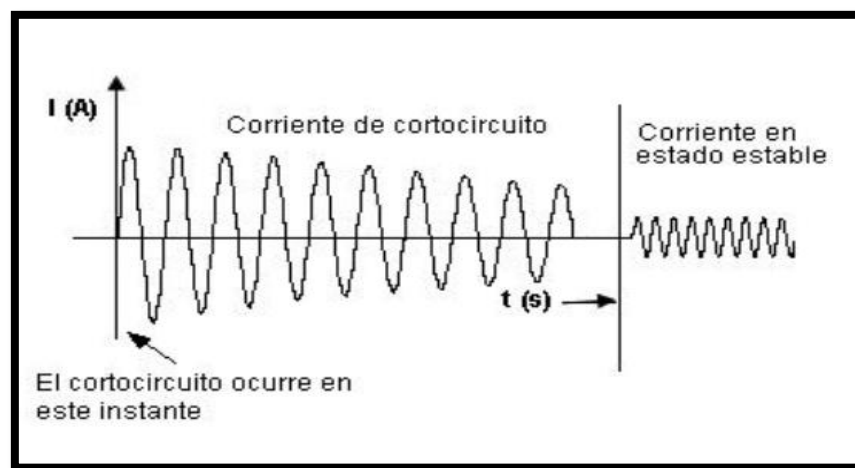


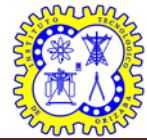
Imagen 2.4. 1

Forma de onda de la corriente de cortocircuito presente en las máquinas rotatorias.

De acuerdo con la imagen anterior, las corrientes parten de un valor alto y decaen a un estado estable después de haber transcurrido un tiempo desde el inicio del cortocircuito, de esta manera se puede hacer una clasificación de las reactancias de acuerdo a su variación con respecto al tiempo, esta clasificación se detalla a continuación.

- Reactancia subtransitoria (X''_d):

Es la reactancia aparente del estator en el instante en que se produce el cortocircuito y determina la corriente que circula en el devanado del estator durante los primeros ciclos mientras dura el cortocircuito.



- Reactancia transitoria ($X'd$):

Esta reactancia determina la intensidad de corriente que circula durante el intervalo posterior a la reactancia subtransitoria. Esta reactancia se presenta aproximadamente a los 0.5 segundos posteriores al inicio de la falla.

- Reactancia síncrona (X_d):

Es la reactancia que determina la intensidad de corriente que circula cuando se ha llegado a un estado estacionario. Esta reactancia se presenta varios segundos después de haber iniciado el cortocircuito.

La imagen siguiente presenta las 3 reactancias descritas.

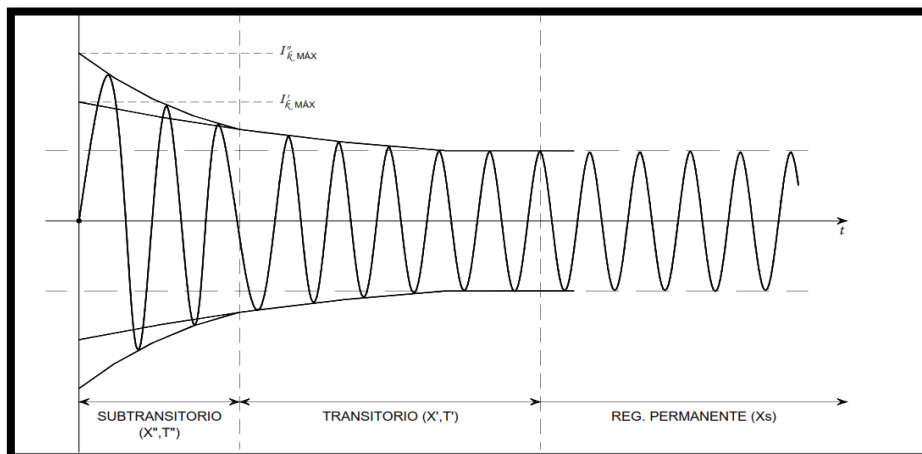


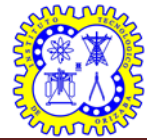
Imagen 2.4. 2

Tipos de reactancias.

2.5 TIPOS DE CORTOCIRCUITO:

Como se explicó al inicio de este capítulo, un cortocircuito es una conexión de baja impedancia entre dos o más componentes de un circuito eléctrico.

Ahora bien, existen diversos tipos de cortocircuito, llamados también fallas, las cuales se mencionan a continuación:



- Falla trifásica sólida.
- Falla de fase a fase sólida.
- Falla de línea a tierra sólida.

La descripción de las fallas mencionadas se presenta a continuación:

- Falla trifásica sólida:

Esta falla describe la condición en que los tres conductores, es decir, las 3 fases se unen físicamente con un valor de cero impedancia entre ellas, como si se soldaran o atornillaran físicamente.

Aun cuando este tipo de condiciones de falla no es frecuente en ocurrencia, resulta por lo general el de mayor valor, y por esta razón, resulta el cálculo básico para las instalaciones industriales y comerciales.

- Falla de fase a fase sólida:

En la mayoría de los sistemas trifásicos, los niveles de falla sólida de fase a fase son de aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica sólida, debido a esto, el cálculo de esta falla no siempre se requiere, ya que no representa el máximo valor.

- Falla de línea a tierra sólida:

En sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra, la falla sólida de fase a tierra es por lo general igual o ligeramente menor que la falla sólida trifásica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia, donde el valor de corriente es significativamente menor.

De todos los cortocircuitos existentes, el cortocircuito trifásico y el de línea a tierra son los que toman mayor relevancia, debido a son los que más afectan a los componentes de una instalación eléctrica industrial.

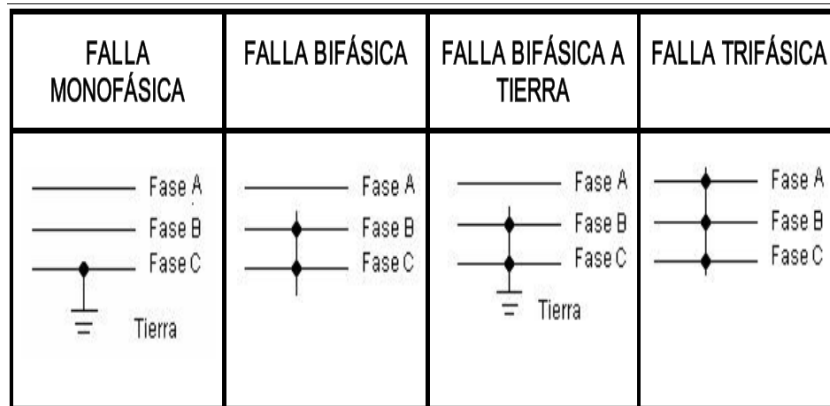
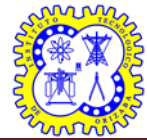


Imagen 2.5. 1

Tipos de cortocircuito existentes.

La imagen anterior muestra los cortocircuitos que se pueden presentar en una instalación industrial.

2.6 VALORES EN POR UNIDAD:

El estudio de los sistemas eléctricos emplea con frecuencia el método de valores por unidad, con el objetivo de simplificar el análisis de los mismos.

El valor en por unidad de una magnitud es la relación de su valor con respecto al valor base.

Esta relación se presenta en la siguiente fórmula:

$$\text{Valor en por unidad} = \frac{\text{valor dado}}{\text{valor base}} \quad \text{Ecuación 2.6. 1}$$

El resultado de esta ecuación arroja un valor adimensional, por lo cual queda demostrado que el procedimiento se simplifica.



Generalmente, para poder determinar los valores en el sistema en por unidad se eligen como valores base la potencia aparente en KVA y la tensión en KV.

2.6.1 CAMBIO DE BASE PARA LOS VALORES EN POR UNIDAD:

En algunas ocasiones la impedancia en por unidad de algún elemento que forma parte del sistema analizado se expresa sobre una base distinta a la seleccionada como base para la parte del sistema en la cual está situado dicho elemento. Debido a esto, se vuelve necesario el referir este elemento a la base nueva.

Para poder lograrlo, es necesario el uso de la fórmula presentada a continuación.

$$X_N = Z_V \frac{V_B^2}{V_N} * \frac{S_N}{S_B} \quad \text{Ecuación 2.6.1. 1}$$

La ecuación 2.6.1.1 identifica los valores de las bases conocidas con la letra B, en este caso VB, e identifica los valores de la base nueva con la letra N, en este caso VN.

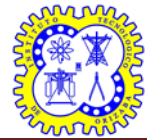
2.6.2 CONVERSIÓN DE VALORES EN POR UNIDAD A VALORES REALES:

Una vez que los cálculos en por unidad en el sistema analizado han finalizado y se requieren conocer los resultados obtenidos, es necesario convertir estos resultados a valores reales, esta conversión se realiza en forma inversa, tal y como se muestra a continuación.

Tabla 2.6.2. 1

Conversión de valores en p.u. a valores reales.

Magnitud a obtener:	Fórmula:
Corriente eléctrica:	$I = (I \text{ p.u.}) (I_{\text{base}})$
Voltaje:	$V = (V \text{ p.u.}) (V_{\text{base}})$
Potencia:	$P = (P \text{ p.u.}) (P_{\text{base}})$



2.7 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO:

Para poder conocer las corrientes de cortocircuito que circulan a través de una red eléctrica se han creado diversos métodos, entre los que destacan cuatro, conocidos por su extensa utilización.

Los métodos mencionados son:

- Método equivalente de Thévenin.
- Método de los MVA.
- Método de las componentes simétricas.
- Método de la matriz de impedancias (Y bus, Z bus).

En este trabajo, solo se describirán los dos primeros métodos, debido a que estos serán utilizados para la obtención de las corrientes de cortocircuito de Central Motzorongo.

2.7.1 MÉTODO EQUIVALENTE DE THÉVENIN.

Cuando este método es seleccionado para realizar el análisis de cortocircuito, el resultado final es una impedancia equivalente en el punto de falla, obtenida con la simplificación del circuito, tal y como se muestra en la sig. Imagen.

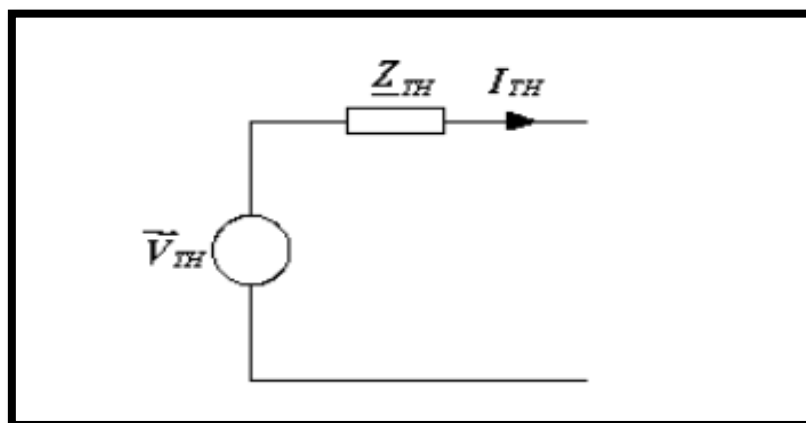
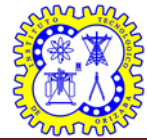


Imagen 2.7.1. 1

Circuito equivalente de Thévenin.



Los pasos a seguir para poder obtener este diagrama equivalente y los valores correspondientes se enlistan a continuación.

1) Trazado del diagrama unifilar:

Este diagrama debe mostrar todos los equipos que son parte del sistema eléctrico a analizar, así como todos los elementos de impedancia, tales como conductores, transformadores y barras conductoras.

2) Selección de la base:

Como se mencionó anteriormente, se debe seleccionar una base apropiada, de manera tal que sea común para la mayoría de los equipos, con la finalidad de cambiar la menor cantidad posible de datos.

Preferentemente se eligen los valores de tensión y potencia más elevados.

3) Obtención de los valores de reactancia:

Tal como lo indica este punto, se procede a obtener la reactancia de los diversos elementos, de acuerdo a las bases seleccionadas, y con el método de valores por unidad. (Las ecuaciones utilizadas para obtener estos valores se presentan más adelante).

4) Trazado del diagrama de reactancias:

Este diagrama se traza de acuerdo a los datos de reactancia obtenidos con el método de valores por unidad.

5) Obtención del circuito equivalente:

Esto se logra con la aplicación de la teoría de circuitos eléctricos, esto es, que se aplican las técnicas de circuitos en serie y paralelo, con la finalidad de lograr una impedancia única, que contenga los valores equivalentes de todo el sistema.



- 6) Determinar el valor de la corriente de cortocircuito simétrica en el punto o puntos de falla.
- 7) Se determina el valor de la corriente de cortocircuito asimétrica en el punto o puntos de falla, tomando como referencia el factor de multiplicación elegido.

Generalmente, este factor es de 1.25, ya que es válido para todo proceso industrial)

- 8) Determinar la potencia de cortocircuito simétrica y asimétrica en el punto de falla.

Para poder cambiar las diversas magnitudes eléctricas a valores por unidad, se utilizan diversas formas, las cuales son expuestas en la siguiente tabla:

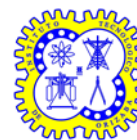
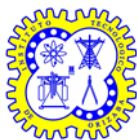
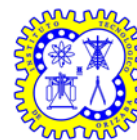
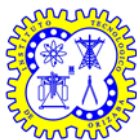


Tabla 2.7.1. 1

Fórmulas para obtener magnitudes eléctricas por el método equivalente de Thévenin.

Magnitud a determinar	Expresión de la ecuación.	Descripción de las variables.
Determinación del equivalente de la red.	$X = \frac{kVA\ b}{kVA\ cc}$	KVA _b = potencia base KVA _{cc} = Potencia de cortocircuito al punto de suministro.
Determinación de la reactancia del transformador.	$X_{pu} = \frac{X\% \ KVA\ b}{100 \ KVA\ t}$	X% = Reactancia del transformador. KVA _b = Potencia base. KVA _t = Potencia del transformador.
Determinación de la reactancia del motor	$X_{pu} = \frac{X\% \ KVA\ b}{100 \ KVA\ m}$	X% Reactancia del motor. KVA _b = Potencia base. Kva _t = Potencia del motor.
Determinación de la reactancia de conductores.	$X_{pu} = \frac{\Omega \ x \ kVA\ b}{(kV\ b)^2 \ x \ 100}$	Ω=Reactancia del conductor en Ω/km KVA _b = Potencia base. kV _b) ² = Tensión base

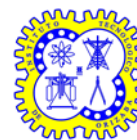
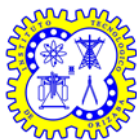


Es importante resaltar, que en las plantas industriales es común el agrupamiento de los motores, con su consecuente valor aproximado de reactancia, esto debido a que en la mayoría de las factorías el número de motores es elevado, por lo cual el calcular el valor de reactancia de cada motor sería un proceso largo y tedioso.

La siguiente tabla muestra estos valores aproximados.

Tabla 2.7.1. 2
Valores de reactancias equivalentes para motores.

Casos	Datos de los motores y otros elementos.	Reactancia subtransitoria X''_d (%)	Reactancia transitoria X'_d (%)
1	600 V o menos. Motores inducción.	25	-
2	600 V o menos. Motores síncronos.	25	33
3	600 V o menos. Motores síncronos, incluyendo conductores y transformador reductor.	31	39
4	Arriba de 600 V. Motores inducción.	20.26	-
5	Arriba de 600 V. Motores síncronos.	15	25

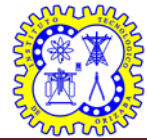


Una vez obtenidos los valores referidos a la base nueva, se procede a obtener los valores de corriente y potencia, apoyándose en las ecuaciones mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 2.7.1. 3

Fórmulas para obtener valores de corriente y potencia de cortocircuito.

Magnitud a determinar:	Expresión de la ecuación:	Descripción de las variables:
Corriente base:	$I_b = \frac{kVA_b}{\sqrt{3}kV}$	- kVA_b: Potencia base. - kV en el punto de falla de línea.
Corriente de cortocircuito en por unidad.	$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{X_{Eq \text{ total}}}$	- X_{Eq} total: Reactancia equivalente en el punto de falla.
Corriente de cortocircuito	$I_{cc} = I_{cc \text{ p. u.}} \times I_b$	- I_{cc} p.u.: Valor de I_{cc} en p.u. - I_b: valor de corriente base.
Potencia de cortocircuito	$P_{cc} = \sqrt{3}VLI_{cc}$	- VL: tensión de línea en el punto de falla. - I_{cc}: corriente de cortocircuito en el punto de falla.



2.7.2 MÉTODO DE LOS MVA:

El método de los MVA es un método sencillo en el cual no es necesario tomar en cuenta la resistencia y reactancia de los elementos que integran al sistema, esta omisión solo se puede llevar a cabo en sistemas de media y alta tensión, ya que los valores de resistencia y reactancia son pequeños, por lo cual el error que se obtiene al no incluirlos se considera insignificante.

Los pasos a seguir para realizar este método son descritos a continuación:

- 1) Convertir la impedancia de los equipos, de las líneas y alimentadores, directamente a MVA. (las ecuaciones se presentan al término de la descripción)
- 2) Crear el diagrama de impedancias, de acuerdo a los datos obtenidos en el paso anterior.
- 3) Combinar los MVA de cortocircuito del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla.
 - Los valores en paralelo se suman directamente.
 - Los valores en serie se combinan como si fueran impedancias en paralelo.
- 4) Calcular la corriente de cortocircuito simétrica y asimétrica, en amperes para el punto de falla.

Las ecuaciones utilizadas para obtener los valores en MVA de los diversos componentes se muestran en la tabla siguiente:

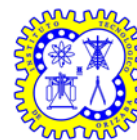
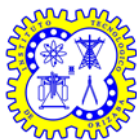


Tabla 2.7.2. 1

Obtención de potencia de cortocircuito por el método de los MVA.

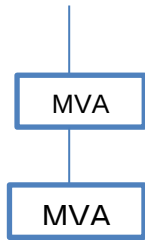
Magnitud a determinar	Expresión de la ecuación.	Descripción de las variables.
Mega Volt-Amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo} \times 100}{X\% \text{ del equipo}}$	MVA_{equipo} = potencia del equipo. $X\%$ = porcentaje de reactancia del equipo.
Mega Volt-Amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo} \times 100}{X_{pu} \text{ del equipo.}}$	MVA_{equipo} = potencia del equipo. X_{pu} = reactancia del equipo en por unidad.
Mega Volt-amperes de cortocircuito.	$MVA_{CC} = \frac{kV_L^2}{X\Omega}$	kV_L^2 = tensión de línea del conductor. $X\Omega$ = reactancia en Ohms.

Otro punto importante a considerar en la aplicación de este método es la manera de obtener el circuito equivalente, apoyándose en la teoría de circuitos eléctricos serie y paralelo, aunque en este método su aplicación sea en forma contraria, tal como se muestra a continuación.



Tabla 2.7.2. 2

Fórmulas para resolver circuitos serie y paralelo por el método de los MVA.

Forma de conexión de los elementos.	Diagrama de conexión de los elementos.	Expresión.
Conexión serie.		$MVA_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{MVA_1} + \frac{1}{MVA_2}}$
Conexión paralelo.		$MVA_{eq} = MVA_1 + MVA_2$



CAPÍTULO III

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO A UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.

Después de haber descrito de manera sencilla y general los dos métodos con los que se realizara el análisis de cortocircuito en Central Motzorongo, se procederá a realizar el mismo.

En primer lugar obtendremos las corrientes de cortocircuito por el método equivalente de Thévenin, para posteriormente realizarlo por el método aproximado de los MVA y así poder comparar y/o comprobar los resultados obtenidos.

3.1 MÉTODO EQUIVALENTE DE THÉVENIN.

El método de Thévenin fue expuesto de manera sencilla en el capítulo anterior, describiendo los pasos a seguir para lograr la obtención de las corrientes de cortocircuito, estos pasos son precisamente los que se llevaran a cabo a lo largo de este capítulo.

1.- Trazado del diagrama unifilar:

Como se indicó en el capítulo anterior, este diagrama debe mostrar a los componentes del sistema eléctrico, así como a los elementos de impedancia.

Imagen 3.1. 1

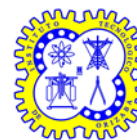
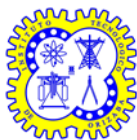
Diagrama unifilar Central Motzorongo.

2.- Selección de la base:

De acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior, para poder realizar el método equivalente de Thevenin es necesario cambiar los valores nominales de los elementos a valores en por unidad, para lo cual se debe elegir una potencia base; en este caso se eligió una base de 2000 KVA, esto debido a que es el valor predominante en los equipos eléctricos.

3.- Obtención de las reactancias:

Una vez que se determinó la potencia base se procedió a obtener los valores de reactancias de los equipos eléctricos, en este caso solo se obtuvo el valor equivalente en por unidad de los transformadores y el generador eléctrico, debido a que la falla fue calculada en los mismos.

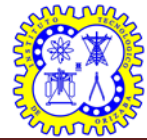


- **Transformadores:**

Tabla 3.1. 1

Valores de reactancias en transformadores

Equipo:	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
Trafo bus-1	2000 kVA 13.8 kV/440 V	7.04% 0.0704 p.u.
Trafo bus-2	2000 kVA 13.8 kV/440 V	6.96% 0.0696 p.u.
Trafo bus-3	2000 kVA 13.8 kV/440 V	6.97% 0.0697 p.u.
Trafo subestación centrifugas de 3ra.	2500 kVA 13.8 kV/440 V	5.632 % 0.05632 p.u.
Trafo subestación molino 1	2000 kVA 13.8 kV/440V	7.16% 0.0716 p.u
Trafo subestación 6	2000 kVA 13.8 kV/440 V	6.24% 0.0624 p.u.
Trafo subestación bomba de agua.	1500 kVA 15 kV/4160 V	6.26% 0.0626 p.u.



- **Generador eléctrico:**

Tabla 3.1. 2

Valores de reactancia del generador eléctrico

Equipo:	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
Generador eléctrico.	12,5000 kVA 10,000 kW 13.8 kV	0.016 p.u.
Total:		0.016 p.u.

4) Trazado del diagrama de reactancias:

Como ya se había mencionado anteriormente, este diagrama debe incluir las reactancias obtenidas, de acuerdo a la base nueva proporcionada anteriormente.

El diagrama obtenido es expuesto en la siguiente imagen.

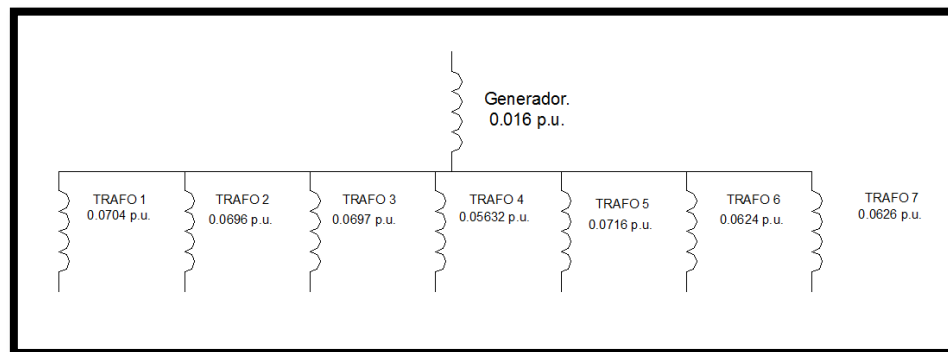


Imagen 3.1. 2

Diagrama de reactancias.



5) Obtención del circuito equivalente:

En el capítulo anterior se mencionó que de acuerdo a la aplicación de la teoría de circuitos en serie y paralelo se obtendría una sola reactancia equivalente, en la cual estuvieran incluidos todos los valores obtenidos.

En el caso del análisis de cortocircuito en el Ingenio Central Motzorongo, se determinó calcular la corriente de cortocircuito en diversos puntos, tal como se muestra en la imagen siguiente.

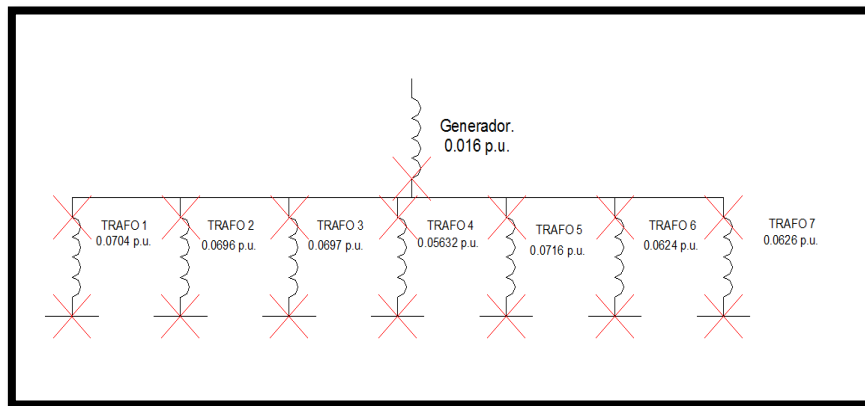


Imagen 3.1. 3

Zonas de falla a calcular.

Por lo tanto, se determinó que el diagrama equivalente es el presentado en la imagen anterior.

6) Determinación del valor de la corriente de cortocircuito en los diferentes puntos de falla.

Como se indicó en la imagen 3.1.3 el valor de la corriente de cortocircuito fue calculado en total en 15 puntos diferentes, a fin de conocer la aportación de cada uno de los equipos.



Los valores obtenidos se presentan a continuación.

- **Falla No.1**

La falla No.1 fue calculada a la salida del generador.

Las fórmulas utilizadas para obtener los valores de corriente y potencia se tomaron de la tabla 2.7.1.3. Perteneciente al Capítulo II.

Para la falla 1:

Tabla 3.1. 3

Falla No.1. Salida del generador.

kVA base:	2000 kVA
kV :	13.8
X p.u:	0.016 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 83.6764$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.016} = 62.5$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 62.5 \cdot 83.6764 = 5.229 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 5.229 = 6.5362 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 5.229 \text{ kA} = 124.999 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 124.999 \text{ kA} = 156.248 \text{ kVA}$$



- **Falla No.2**

La falla No. 2 fue calculada en el lado de alta tensión del transformador perteneciente al bus No.1.

En este caso, la potencia elegida como base, es de la misma magnitud que la del transformador, por lo que no fue necesario referirlo a la base nueva.

Las operaciones realizadas para obtener el valor de la corriente de cortocircuito en este punto se muestran a continuación, tomando como referencia las ecuaciones presentadas en la tabla 2.7.1.3

Para la falla No.2:

Tabla 3.1. 4

Falla No.2. Lado de alta tensión del trafo No.1

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.0704 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 83.676$$

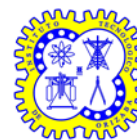
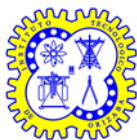
$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0704} = 14.20$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.20 \cdot 83.676 = 1.188 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.188 = 1.485 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.188 \text{ kA} = 28.399 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 28.399 \text{ kA} = 35.498 \text{ kVA}$$



- **Falla No.3:**

La falla No. 3 se calculó en el lado de baja tensión del transformador ubicado en el bus No.1.

Para la falla 3:

Tabla 3.1. 5

Falla No. 3. Lado de baja tensión del trafo No. 1

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.0704 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0704} = 14.20$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.20 \cdot 2624.39 = 37.266 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 37.266 \text{ kA} = 46.582 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 37.266 \text{ kA} = 28.399 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 28.399 \text{ kVA} = 35.49875 \text{ kVA}$$

- **Falla No.4:**

La falla No. 4 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en el bus No. 2.

Para la falla No.4:

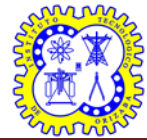


Tabla 3.1. 6

Falla No. 4. Lado de alta tensión del trafo No. 2

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.0696 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 83.676$$

$$I_{cc \text{ p.u.}} = \frac{1}{0.0696} = 14.36$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.36 \cdot 83.676 = 1.201 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.201 \text{ kA} = 1.50125 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.201 \text{ kA} = 28.705 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 28.705 \text{ kVA} = 35.0625 \text{ kVA}$$

- **Falla No.5:**

La falla No. 5 está ubicada en el lado de baja tensión del transformador perteneciente al bus 2.

Para la falla 5:

Tabla 3.1. 7

Falla No. 5. Lado de baja tensión del trafo No. 2

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.0696 p.u.



$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$cc \text{ p. u.} = \frac{1}{0.0696} = 14.3678$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.3678 \cdot 2624.39 = 37.706 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 37.706 \text{ kA} = 47.1325 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 37.706 \text{ kA} = 28.735 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 28.735 \text{ kVA} = 35.91875 \text{ kVA}$$

- **Falla No.6:**

La falla No.6 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en el bus No.3.

Para la falla No.6:

Tabla 3.1. 8

Falla No. 6. Lado de alta tensión del trafo No. 3

Kva base:	2000kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.0697 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.13.8} = 83.676$$

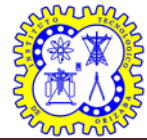
$$I_{cc} \text{ p. u.} = \frac{1}{0.0697} = 14.34$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.34 \cdot 83.676 = 1.199 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.199 \text{ kA} = 1.49875 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.199 \text{ kA} = 28.658 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 28.658 \text{ kVA} = 35.8225 \text{ kVA}$$



- **Falla No.7:**

La falla No. 7 fue calculada en el lado de baja tensión del transformador instalado en el bus No. 3.

Para la falla 7:

Tabla 3.1. 9

Falla No. 7. Lado de baja tensión del trafo No. 3

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.0697

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0697} = 14.3472$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.3472 \cdot 2624.39 = 37.642 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 37.642 \text{ kA} = 47.0525 \text{ kA}$$

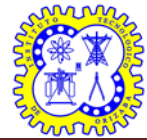
$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 37.642 \text{ kA} = 28.686 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 28.686 \text{ kVA} = 35.8575 \text{ kVA}$$

- **Falla No.8:**

La falla No. 5 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en la subestación de “Centrifugas de 3ra”.

En éste caso, la capacidad nominal del transformador es de 2500 kVA, por lo que fue necesario referirlo a la base nueva, basándose en la ecuación 2.6.1.1. Perteneciente al capítulo II.



$$X \text{ p. u} = 7.04\% \frac{2000}{2500} = 5.632 \% \text{ ó } 0.05632 \text{ p. u.}$$

Una vez obtenido el valor referido a la base nueva, se procedió a calcular la corriente en éste punto.

Para la falla 8:

Tabla 3.1. 10

Falla No. 8. Lado de alta tensión del trafo No. 4

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.05632 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 83.676$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.05632} = 17.75$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 14.34 \cdot 83.676 = 1.485 \text{ kA}$$

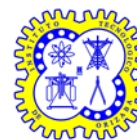
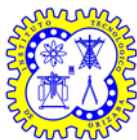
$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.485 \text{ Ka} = 1.85625 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.485 \text{ kA} = 35.493 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 35.493 \text{ kVA} = 44.36625 \text{ kVA}$$

- **Falla No.9:**

La falla No. 9 fue calculada en el lado de baja tensión del transformador ubicado en la subestación de “Centrifugas de 3ra”.



Para la falla 9:

Tabla 3.1. 11

Falla No. 9. Lado de baja tensión del trafo No. 4

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.05632

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.05632} = 17.7556$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 17.7556 \cdot 2624.39 = 46.597 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 46.597 \text{ Ka} = 58.24625 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 46.597 \text{ kA} = 35.511 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 35.511 \text{ Kva} = 44.388 \text{ kVA}$$

- **Falla No.10:**

La falla No. 6 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en la subestación del molino No.1.

Para la falla No.10:

Tabla 3.1. 12

Falla No.10.Lado de alta tensión del trafo No. 5

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.0716 p.u.



$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.13.8} = 83.676$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0716} = 13.966$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 13.966 \cdot 83.676 = 1.168 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.168 \text{ Ka} = 1.46 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.168 \text{ kA} = 27.917 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 27.917 \text{ kVA} = 34.89625 \text{ kVA}$$

- **Falla No.11:**

La falla No. 11 se calculó en el lado de baja tensión del transformador ubicado en la subestación del molino No. 1

Para la falla 11:

Tabla 3.1. 13

Falla No.11. Lado de baja tensión del trafo No. 5

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.0716 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0716} = 13.9664 \text{ p. u.}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 13.9664 \cdot 2624.39 = 36.653 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 36.653 \text{ Ka} = 45.81625 \text{ kA.}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 36.653 \text{ kA} = 27.932 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 27.932 \text{ Kva} = 34.915 \text{ kVA}$$



- **Falla No.12:**

La falla No.12 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en la subestación del molino No.6.

Para la falla 12:

Tabla 3.1. 14

Falla No.12. Lado de alta tensión del trafo No. 6

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.0624 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 83.676$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.0624} = 16.02$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 16.02 \cdot 83.676 = 1.340 \text{ kA}$$

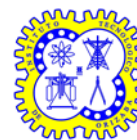
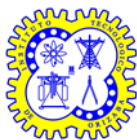
$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.340 \text{ Ka} = 1.675 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.340 \text{ kA} = 32.028 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 32.028 \text{ Kva} = 40.035 \text{ kVA}$$

- **Falla No.13:**

La falla No. 13 se calculó a la salida del transformador instalado en la subestación del molino No.6.



Para la falla 13:

Tabla 3.1. 15

Falla No.13. Lado de baja tensión del trafo No. 6

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.0624 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc} \text{ p. u.} = \frac{1}{0.0624} = 16.0256 \text{ p. u.}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 16.02564 \cdot 2624.39 = 42.057 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 42.057 \text{ Ka} = 52.57125 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 42.057 \text{ kA} = 32.051 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 32.051 \text{ Kva} = 40.063 \text{ kVA}$$

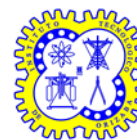
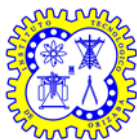
- **Falla No.14:**

La falla No. 8 se calculó en el lado de alta tensión del transformador instalado en la subestación de la bomba de agua.

Al igual que en la subestación de “centrifugas de 3ra” fue necesario referir los kVA nominales del transformador a la nueva base. El resultado se muestra a continuación.

$$X \text{ p. u} = 4.70\% \frac{2000}{1500} = 6.2666\% \text{ ó } 0.06266 \text{ p. u.}$$

Una vez obtenido éste resultado, se procedió a calcular la falla.



Para la falla 14:

Tabla 3.1. 16

Falla No. 14. Lado de alta tensión del trafo No. 7

Kva base:	2000 kVA
Kv:	13.8 kV
Z%:	0.06266 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 13.8} = 86.676$$

$$I_{cc} \text{ p. u.} = \frac{1}{0.06266} = 15.9574 \text{ p. u.}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 15.9574 \cdot 86.676 = 1.383 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.393 \text{ kA} = 1.728 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc} = 1.732 \cdot 13.8 \cdot 1.383 \text{ kA} = 33.055 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc} = 1.25 \cdot 33.055 \text{ kVA} = 41.3198 \text{ kVA}$$

- **Falla No.15:**

La falla No. 15 está ubicada en el lado de baja tensión del transformador instalado en la subestación que alimenta a la bomba sultzer.

Para la falla No.15:

Tabla 3.1. 17

Falla No. 15. Lado de baja tensión del trafo No. 7

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.06266 p.u.



$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.06266} = 15.9574 \text{ p. u.}$$

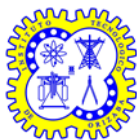
$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 15.9574 \cdot 2624.39 = 41.878 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 41.878 \text{ kA} = 52.348 \text{ kA}$$

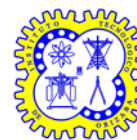
$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 41.878 \text{ kA} = 31.914 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 31.914 \text{ kVA} = 39.89 \text{ kVA}$$

Los resultados obtenidos fueron concentrados en la siguiente tabla:



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
REPORTE DE RESIDENCIA PROFESIONAL



No. de falla:	Corriente de cortocircuito simétrica:	Corriente de cortocircuito asimétrica:	Potencia de cortocircuito simétrica:	Potencia de cortocircuito asimétrica:
Generador. falla 1	5.229 kA	6.536 kA	124.999 kVA	156.248 kVA
Trafo 1. Falla en alta tensión.	1.188 kA	1.485 kA	28.399 kVA	35.498 kVA
Trafo 1. falla en baja tensión	37.266 kA	46.582 kA	28.399 kVA	35.498 kVA
Trafo 2. Falla en alta tensión.	1.201 kA	1.501 kA	28.705 kVA	35.0625 kVA
Trafo 2.Falla en baja tensión.	37.706 kA	47.13 kA	28.735 kVA	35.918 kVA
Trafo 3.Falla en alta tensión.	1.199 kA	1.498 kA	28.658 kVA	35.8225 kVA
Trafo 3.Falla en baja tensión.	37.642 kA	47.052 kA	28.686 kVA	35.85 kVA
Trafo 4.Falla en alta tensión.	1.485 kA	1.856 kA	35.493 kVA	44.36 kVA
Trafo 4.Falla en baja tensión.	46.597 kA	58.246 kA	35.511 kVA	44.388 kVA
Trafo 5.Falla en alta tensión.	1.168 kA	1.46 kA	27.917 kVA	34.89 kVA
Trafo 5.Falla en baja tensión.	36.653 kA	45.816 kA	27.932 kVA	34.89 kVA
Trafo 6. Falla en alta tensión.	1.340 kA	1.675 kA	32.028 kVA	40.035 kVA
Trafo 6.Falla en baja tensión.	42.057 kA	52.571 kA	32.051 kVA	40.063 kA
Trafo 7.Falla en alta tensión.	1.393 kA	1.74 kA	33.055 kVA	41.31 kVA
Trafo 7.Fallo en baja tensión.	42.192 kA	52.74 kA	31.914 kVA	39.89 kVA



3.2 MÉTODO DE LOS MVA:

Una vez realizado el análisis de cortocircuito por el método equivalente de Thévenin, se procedió a realizar el análisis del mismo sistema eléctrico por el método de los MVA, esto con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos con el método anterior.

De acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo II, el primer paso a seguir para realizar este método es convertir la impedancia de las fuentes de cortocircuito directamente a MVA, apoyándose en las ecuaciones mostradas en la tabla 2.7.2.1

En este caso, por la ubicación de las fallas, presentadas en la imagen 3.1.3 al realizar la sustitución de las formulas correspondientes, se obtiene directamente el valor requerido.

Es importante aclarar, que al utilizar este método, se obtiene únicamente la potencia de cortocircuito, la cual en este caso, fue comparada con la obtenida por el método anterior.

Debido a la ubicación de las fallas, los valores de potencia obtenidos son iguales para ambos lados del transformador, ya que como se sabe, un transformador es una maquina eléctrica capaz de modificar los valores de voltaje y corriente, manteniendo el mismo nivel de potencia.

- **Falla No.1:**

Tabla 3.2. 1

Falla No. 1. Método de los MVA

kVA del equipo:	12,500 kVA
kV :	13.8 kV
X p.u:	10%



$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{12.5 \cdot 100}{10 \%} = 125 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 125 = 156.25 \text{ kVA}$$

El factor 1.25 se utilizó al igual que en el método anterior, para calcular el valor de la potencia asimétrica.

- **falla No. 2. Trafo 1:**

Tabla 3.2. 2

Falla No. 2. Método de los MVA.

kVA del equipo:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	7.04 %

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000 \cdot 100}{7.04 \%} = 28.409 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 28.409 = 35.511 \text{ kVA}$$

- **Falla No. 3. Trafo 2:**

Tabla 3.2. 3

Falla No. 3. Método de los MVA

kVA equipo:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	6.96 %



$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000 \cdot 100}{6.96 \%} = 28.735 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 28.735 = 35.918 \text{ kVA}$$

- **Falla No.4. trafo 3:**

Tabla 3.2. 4

Falla No. 4. Método de los MVA

kVA equipo:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	6.97 %

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000 \cdot 100}{6.97 \%} = 28.694 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 28.694 = 35.867 \text{ kVA.}$$

- **Falla No.5. trafo 4:**

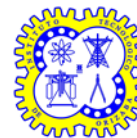
Tabla 3.2. 5

Falla No. 5. Método de los MVA

kVA equipo:	2500 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	7.04%

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000 \cdot 100}{7.04 \%} = 35.511 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 35.511 = 44.388 \text{ kVA}$$



- **Falla No.6. trafo 5:**

Tabla 3.2. 6

Falla No. 6. Método de los MVA

kVA equipo:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	7.16 %

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000 * 100}{7.16 \%} = 27.932 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 * 27.932 = 34.915 \text{ kVA}$$

- **Falla No.7. trafo 6:**

Tabla 3.2. 7

Falla No. 7. Método de los MVA

kVA del equipo:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	6.24 %

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{2000*100}{6.24 \%} = 32.051 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 * 32.051 = 40.064 \text{ kVA}$$



- **Falla No.8. trafo 7.**

Tabla 3.2. 8

Falla No. 8. Método de los MVA

kVA del equipo:	1500 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	4.70%

$$\text{kVAcc simétricos} = \frac{1500 \cdot 100}{4.70 \%} = 31.915 \text{ kVA}$$

$$\text{kVAcc asimétricos} = 1.25 \cdot 31.915 = 40.063 \text{ kVA}$$

Los valores obtenidos, son presentados en la siguiente tabla:



Tabla 3.2. 9

Potencia simétrica y asimétrica. Método de los MVA

No. de falla:	Potencia simétrica	Potencia asimétrica:
Falla 1. Generador.	125 kVA	156.25 kVA
Falla 2. Trafo 1.	28.409 kVA	35.511 kVA
Falla 3. Trafo 2.	28.735 kVA	35.918 kVA
Falla 4. Trafo 3	28.694 kVA	35.867 kVA
Falla 5. Trafo 4	35.511 kVA	44.388 kVA
Falla 6. Trafo 5	27.932 kVA	34.915 kVA
Falla 7. trafo 6	32.051 kVA	40.064 kVA
Falla 8. Trafo 7	31.915 kVA	40.063 kVA

Ahora bien, los valores mostrados en la tabla anterior, se compararon con los valores obtenidos por el método anterior. Esto se muestra en la tabla siguiente.

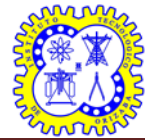


Tabla 3.2. 10

Potencia simétrica y asimétrica. Método de Thévenin y MVA

No. de falla:	KVA simétricos. Thevenin.	kVA simétricos MVA.	KVA asimétricos. Thevenin.	kVA asimétricos. MVA.
1	124.999 kVA	125 kVA	156.248 kVA	156.25 kVA
2	28.399 kVA	28.409 kVA	35.498 kVA	35.511 kVA
3	28.399 kVA	28.409 kVA	35.4987 kVA	35.511 kVA
4	28.705 kVA	28.735 kVA	35.065 kVA	35.918 kVA
5	28.735 kVA	28.735 kVA	35.9187 kVA	35.918 kVA
6	28.658 kVA	28.694 kVA	35.8225 kVA	35.867 kVA
7	28.686 kVA	28.694 kVA	35.8575 kVA	35.867 kVA
8	35.493 kVA	35.511 kVA	44.3625 kVA	44.388 kVA
9	35.511 kVA	35.511 kVA	44.388 kVA	44.388 kVA
10	27.917 kVA	27.932 kVA	34.896 kVA	34.915 kVA
11	27.932 kVA	27.932 kVA	34.915 kVA	34.915 kVA
12	32.0281kVA	32.051 kVA	40.035 kVA	40.063 kVA
13	32.051 kVA	32.051 kVA	40.063 kVA	40.063 kVA
14	33.294 kVA	31.915 kVA	41.61 kVA	40.063 kVA
15	33.154 kVA	31.915 kVA	41.44 kVA	40.063 kVA

Como se puede observar en la tabla anterior, los resultados obtenidos se aproximan, por lo que se comprobó que el análisis de cortocircuito fue realizado de manera correcta.



3.3 CÁLCULO DE FALLAS EN CCM'S POR EL MÉTODO EQUIVALENTE DE THÉVENIN.

Una vez realizado el análisis de cortocircuito en los transformadores, se procedió a calcular la falla en los CCM's de las diversas áreas, mediante el método equivalente de Thévenin.

El primer paso realizado fue el trazado del diagrama unifilar, para este caso, se obtuvieron diversos diagramas, debido a que cada uno indica el bus al que pertenecen, los circuitos que lo integran, y los CCM's pertenecientes a cada circuito.

En primer lugar, se analizó el bus 1. Obteniendo el siguiente diagrama.

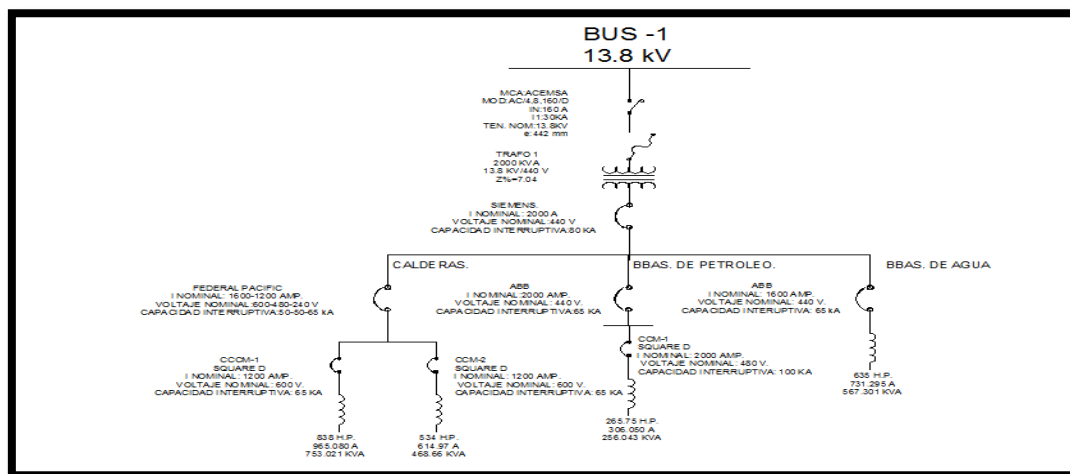


Imagen 3.3. 1

Diagrama unifilar bus 1.

Posteriormente, fue seleccionada la potencia base, para este caso, es la misma que la elegida para el cálculo en los transformadores.

Posterior a la selección de la base, se procedió a obtener el diagrama de reactancias, refiriendo las mismas a la base nueva.

Con la finalidad de simplificar este método, y así lograr un mejor entendimiento del mismo, se optó por clasificar los motores de cada CCM de acuerdo al calibre



utilizado, para así obtener una reactancia equivalente de los mismos, y por consiguiente una potencia equivalente, tal como se muestra en la imagen siguiente:

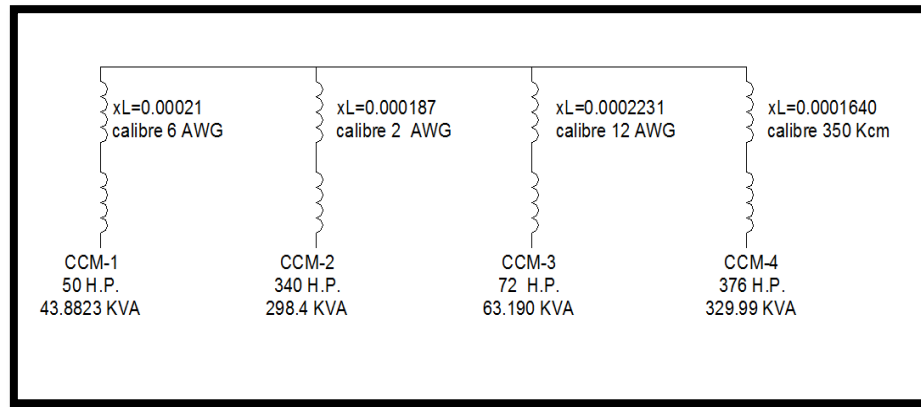


Imagen 3.3. 2

Circuito equivalente. CCM-1 calderas.

La imagen anterior muestra el CCM-1 del área de calderas, en la cual se muestra el valor equivalente en H.P. De cada grupo de motores de acuerdo al calibre utilizado, al mismo tiempo se muestra en serie con el motor equivalente la reactancia del conductor, obtenida de acuerdo a la longitud del mismo. Los valores de reactancia de cada conductor en Ω/km fueron tomados de la tabla mostrada a continuación.

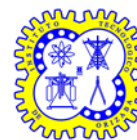
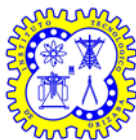


Tabla 3.3. 1

Valores de reactancias equivalentes en conductores eléctricos.

TABLAS DE REACTANCIA Y RESISTENCIA DE LOS CABLES EN OHM/1000M														
calibre/material	XL		RL cobre			RL aluminio			IZ cobre			IZ aluminio		
	pvc	aluminio	pvc	aluminio	acero	pvc	aluminio	acero	pvc	aluminio	acero	pvc	aluminio	acero
14	0.058	0.073	3.100	3.100	3.100				2.815	2.815	2.822	0.025	0.025	0.032
12	0.054	0.068	2.000	2.000	2.000	3.200	3.200	3.200	1.824	1.824	1.830	2.904	2.904	2.910
10	0.050	0.063	1.200	1.200	1.200	2.000	2.000	2.000	1.102	1.102	1.107	1.822	1.822	1.827
8	0.052	0.065	0.780	0.780	0.780	1.300	1.300	1.300	0.725	0.725	0.730	1.193	1.193	1.198
6	0.051	0.064	0.490	0.490	0.490	0.810	0.810	0.810	0.463	0.463	0.469	0.751	0.751	0.757
4	0.048	0.060	0.310	0.310	0.310	0.510	0.510	0.510	0.300	0.300	0.305	0.480	0.480	0.485
3	0.047	0.059	0.250	0.250	0.250	0.400	0.410	0.400	0.245	0.245	0.251	0.380	0.389	0.386
2	0.045	0.057	0.190	0.200	0.200	0.320	0.320	0.320	0.191	0.200	0.205	0.308	0.308	0.313
1	0.046	0.057	0.150	0.160	0.160	0.250	0.260	0.250	0.155	0.164	0.169	0.245	0.254	0.250
1/0	0.044	0.055	0.120	0.130	0.120	0.891	0.210	0.200	0.127	0.136	0.132	0.641	0.208	0.204
2/0	0.043	0.054	0.100	0.100	0.100	0.160	0.160	0.160	0.109	0.109	0.114	0.163	0.163	0.168
3/0	0.042	0.052	0.077	0.082	0.079	0.130	0.130	0.130	0.088	0.092	0.094	0.135	0.135	0.140
4/0	0.041	0.051	0.062	0.067	0.063	0.100	0.110	0.100	0.074	0.078	0.079	0.108	0.117	0.112
250	0.041	0.052	0.052	0.057	0.054	0.085	0.090	0.086	0.065	0.069	0.071	0.094	0.099	0.100
300	0.041	0.051	0.044	0.049	0.045	0.071	0.076	0.072	0.057	0.062	0.063	0.082	0.086	0.087
250	0.040	0.050	0.038	0.043	0.039	0.061	0.066	0.063	0.052	0.056	0.057	0.072	0.077	0.078
400	0.040	0.049	0.033	0.038	0.035	0.054	0.059	0.055	0.047	0.052	0.053	0.066	0.071	0.071
500	0.039	0.048	0.027	0.032	0.029	0.043	0.048	0.045	0.041	0.046	0.047	0.056	0.060	0.061
600	0.039	0.048	0.023	0.028	0.025	0.036	0.041	0.038	0.038	0.042	0.043	0.049	0.054	0.055
750	0.038	0.048	0.019	0.024	0.021	0.029	0.034	0.031	0.034	0.038	0.040	0.043	0.047	0.049
1000	0.037	0.046	0.015	0.019	0.018	0.023	0.027	0.025	0.030	0.033	0.036	0.037	0.040	0.043



Posteriormente, cada grupo de motores fue convertido a su correspondiente valor en por unidad, utilizando la ecuaciones presentadas en el capítulo II en la tabla 2.7.1.1 agrupándolo con su respectiva reactancia en serie, la cual, como ya se había mencionado anteriormente, pertenece al conductor.

Las operaciones presentadas a continuación muestran el cambio a valores por unidad de los diversos equipos, no sin antes destacar que la reactancia equivalente del motor expresada en porcentaje en la tabla 2.7.1.1. Para el caso de motores de inducción es del 25%, tal como fue indicado en el capítulo II en la tabla 2.7.1.2

Potencia base: **2000 KVA**

Reactancia equivalente de motores de inducción menores a 600 Volts: 25%

$$(0.25) \frac{2000 \text{ KVA}}{43.8823 \text{ KVA}} = 11.3941 + 0.00021 = 11.3943 \text{ p. u.}$$

$$(0.25) \frac{2000 \text{ KVA}}{298.4 \text{ KVA}} = 1.67560 + 0.000187 = 1.675787 \text{ p. u.}$$

$$(0.25) \frac{2000 \text{ KVA}}{63.19 \text{ KVA}} = 7.91264 + 0.0002231 = 7.91286 \text{ p. u.}$$

$$(0.25) \frac{2000 \text{ KVA}}{329.99 \text{ KVA}} = 1.515 + 0.0001640 = 1.5153 \text{ p. u.}$$

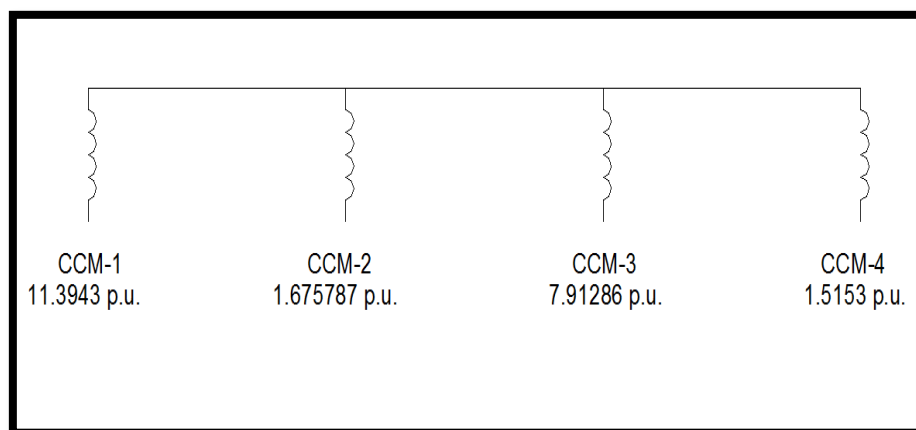


Imagen 3.3. 3

Circuito equivalente calderas.



Los resultados obtenidos en las ecuaciones anteriores se muestran en el diagrama de la imagen 3.3.3.

Una vez obtenidas las reactancias se procedió a reducir el circuito, para así obtener una única reactancia equivalente apoyándose en la sig. Ecuación.

$$X \text{ p.u. equivalente} = \frac{1}{\frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_L} + \frac{1}{x_L} + \frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 3.1. 1}$$

Las operaciones realizadas se muestran a continuación:

$$X \text{ p.u.} = \frac{1}{\frac{1}{11.3943} + \frac{1}{1.675787} + \frac{1}{7.91286} + \frac{1}{1.5153}}$$

$$X \text{ p.u.} = \frac{1}{0.08776 + 0.59673 + 0.12637 + 0.6599}$$

$$X \text{ p.u.} = \frac{1}{1.47076} = 0.67992$$

Reactancia equivalente total del CCM-1 de calderas: **0.67992 p.u.**

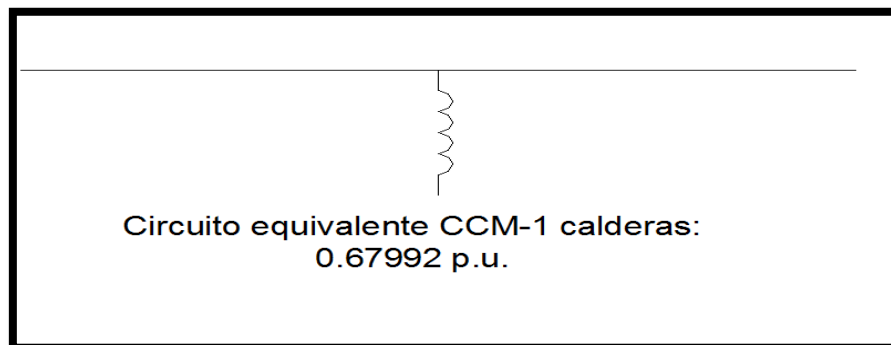
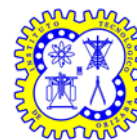
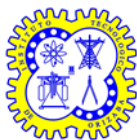


Imagen 3.3. 4

Circuito equivalente total. Área calderas.



Este procedimiento fue realizado con cada una de las áreas que pertenecen al bus 1. Los resultados obtenidos son presentados en las tablas siguientes.

- **Circuito Calderas. Bus-1**

Tabla 3.3. 2

Valores instalados en el área calderas.

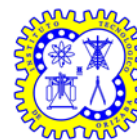
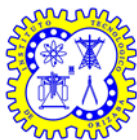
Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA	Reactancia equivalente.
CCM-1	838 H.P.	753.021 KVA	0.67992 p.u.
CCM-2	534 H.P.	468.66 KVA	1.066 p.u.
Total:	1372 H.P.	1221.681KVA	0.415186 p.u.

- **Circuito bombas de agua. Bus 1:**

Tabla 3.3. 3

Valores instalados en el circuito Bbas. De agua.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	635 H.P.	557.301 KVA	0.8813 p.u.
Total:	635 H.P.	567.301 KVA	0.8813p.u.



- **Circuito bombas de petróleo. Bus 1:**

Tabla 3.3. 4

Valores instalados en el circuito bombas de petróleo.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	265.75 H.P.	256.043 KVA	1.9527 p.u.
Total:	265.75 H.P.	256.043 KVA	1.9527 p.u.

Una vez reunidos los valores de los circuitos que integran el bus 1 se procedió a obtener los diagramas de reactancias, de acuerdo al circuito al que pertenecen.

El diagrama de reactancias presentado en la siguiente imagen pertenece al área de calderas, en la que se muestra el valor de reactancia equivalente.

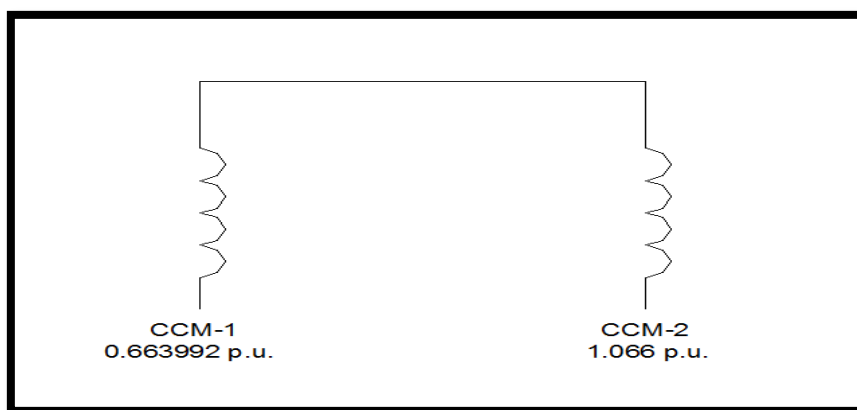
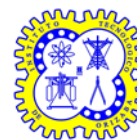
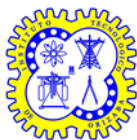


Imagen 3.3. 5

Diagrama circuito calderas.

Una vez obtenido el circuito correspondiente, se procedió a calcular la corriente de falla en cada CCM.



- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 5

Valores instalados en el ccm 1. Calderas.

Kva base:	2000kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.663992 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.663992} = 1.5060$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.5060 \cdot 2624.39 = 3.952 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 3.952 = 4.940 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 3.952 \text{ kA} = 3.012 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 3.012 \text{ kVA} = 3.765 \text{ kVA}$$

- **Para el ccm-2:**

Tabla 3.3. 6

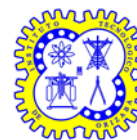
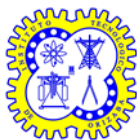
Valores instalados en el ccm 2. Calderas.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.066 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.1066} = 0.93732$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.93732 \cdot 2624.39 = 2.459 \text{ kA}$$



Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 2.459 = 3.074 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc \text{ sim}} = 1.732 * 0.44 * 2.459 \text{ kA} = 1.873 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc \text{ asim}} = 1.25 * 1.873 \text{ kVA} = 2.342 \text{ kVA}$

- **Bombas de agua:**

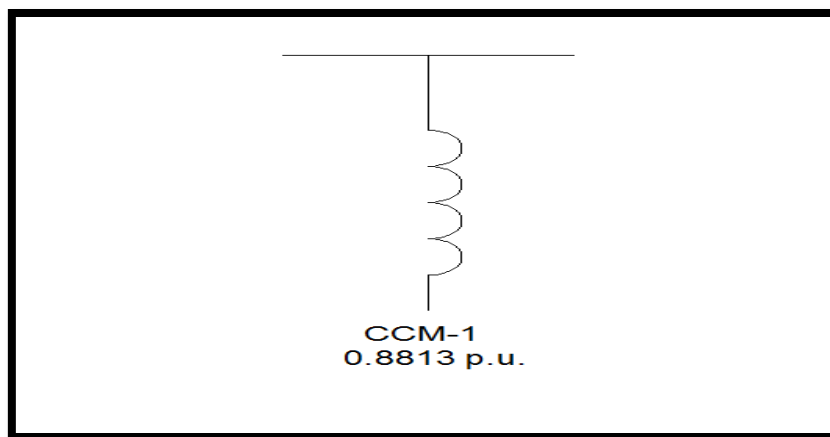


Imagen 3.3. 6

Diagrama circuito bombas de agua.

El circuito de bombas de agua cuenta con un solo CCM, tal como lo indica el diagrama anterior.

- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 7

Valores instalados en el ccm 1. Bbas. De agua.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.8813 p.u.



$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.8813} = 1.1346$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.1346 \cdot 2624.39 = 2.977 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 2.977 \text{ kA} = 3.722 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 2.977 \text{ kVA} = 2.269 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.874 \text{ kA} = 2.836 \text{ kVA}$$

- **Bombas de petróleo:**

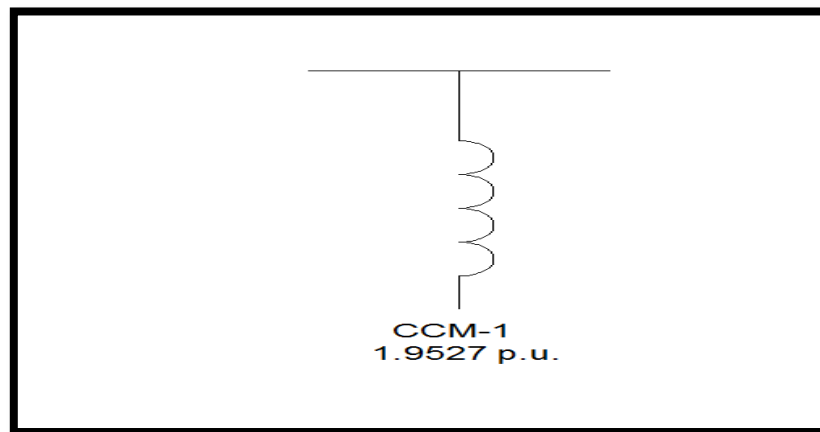


Imagen 3.3. 7

Diagrama circuito bombas de petróleo.

Al igual que el caso anterior, el circuito bombas de petróleo cuenta con un único CCM

- **Para el ccm-1:**

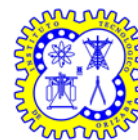
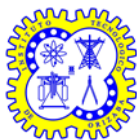


Tabla 3.3. 8

Valores instalados en el ccm 1. Bbas. De petróleo.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.9527 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.19527} = 0.5120$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.5120 \cdot 2624.39 = 1.343 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.343 = 1.679 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.343 \text{ kA} = 1.024 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.024 \text{ kVA} = 1.280 \text{ kVA}$$

- **BUS No.2:**

Para analizar el bus 2 se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, es decir, se agruparon los motores de acuerdo al calibre utilizado, para posteriormente, integrarlos en una sola reactancia equivalente.

Los resultados de las diversas áreas pertenecientes a este bus son mostradas a continuación:

- **Circuito secado y envase. Bus 2:**

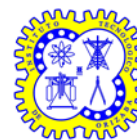
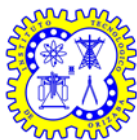


Tabla 3.3. 9

Valores instalados en el circuito secado y envase.

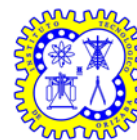
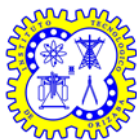
Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	386.5 H.P.	339.207 KVA	1.4748 p.u.
Total:	386.5 H.P.	339.207 KVA	1.4748 p.u.

- **Circuito Batey-Molinos. Bus 2:**

Tabla 3.3. 10

Valores instalados en el circuito Batey-Molinos.

Equipo:	Capacidad: HP:	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	231 H.P.	203.175 KVA	2.4609 p.u.
CCM-2	406 H.P	356.324 KVA	1.4032 p.u.
CCM-3	333.5 H.P.	292.695 KVA	1.70826 p.u.
CCM-4	242.5 H.P.	212.82 KVA	2.3492 p.u.
Total:	1213.5 H.P.	1065.02 KVA	0.4694 p.u.



- **Circuito Clarificación-Evaporación. Bus 2:**

Tabla 3.3. 11

Valores instalados en el circuito Clarificación - Evaporación

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	304.5 H.P.	267.243 KVA	1.87095 p.u.
CCM-2	189.5 H.P.	166.314 KVA	3.006 p.u.
CCM-3	448 H.P.	393.185 KVA	1.271 p.u.
CCM-4	285 H.P.	250.129 KVA	1.998 p.u.
CCM-5	115 H.P.	100.92 KVA	4.9544 p.u.
total:	1342 H.P.	1177.79 KVA	0.4243p.u.

- **Secado y envase:**

Este circuito perteneciente al bus 2 cuenta con un único CCM, como se muestra en la sig. Imagen.

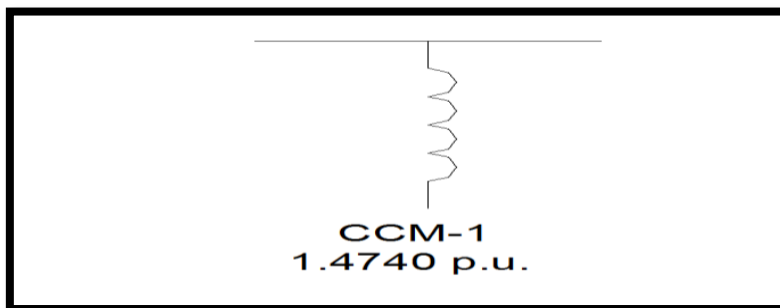


Imagen 3.3. 8

Diagrama circuito secado y envase



- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 12

Valores instalados en el ccm 1. Secado y envase

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.4740 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.4740} = 0.6784$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.6784 \cdot 2624.39 = 1.780 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.780 = 2.225 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.780 \text{ kA} = 1.356 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.356 \text{ kVA} = 1.645 \text{ KvA}$$

- **Batey-molinos:**

Este circuito cuenta con 4 CCM's.

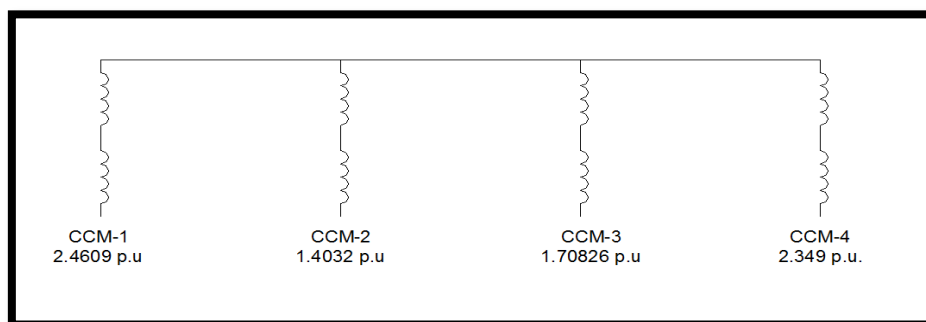
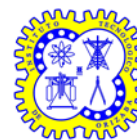
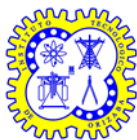


Imagen 3.3. 9

Diagrama circuito Batey-Molinos



- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 13

Valores instalados en el ccm 1. Batey-Molinos.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	2.4609 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{2.4609} = 0.40635$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.40635 \cdot 2624.39 = 1.066 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.066 = 1.333 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.066 \text{ kA} = 0.81269 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 0.81269 \text{ kVA} = 1.015 \text{ KvA}$$

• **Para el ccm-2:**

Tabla 3.3. 14

Valores instalados en el ccm 2. Batey-Molinos

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.4032 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.4032} = 0.712648$$



Corriente de cortocircuito simétrica = $0.712648 * 2624.39 = 1.870 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 1.066 = 2.337 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = Pcc sim = $1.732 * 0.44 * 1.870 \text{ kA} = 1.425 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = Pcc asim = $1.25 * 1.425 \text{ kVA} = 1.781 \text{ KvA}$

- **Para el ccm-3:**

Tabla 3.3. 15

Valores instalados en el ccm 3. Batey-Molinos.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.70826 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} * 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.70826} = 0.58539$$

Corriente de cortocircuito simétrica = $0.58539 * 2624.39 = 1.536 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 1.536 = 1.920 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = Pcc sim = $1.732 * 0.44 * 1.536 \text{ kA} = 1.170 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = Pcc asim = $1.25 * 1.170 \text{ kVA} = 1.463 \text{ KvA}$

Para el ccm-4:



Tabla 3.3. 16

Valores instalados en el ccm 4. Batey-Molinos.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	2.34929 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{2.34929} = 0.4256$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.4256 \cdot 2624.39 = 1.117 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.117 = 1.396 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.117 \text{ kA} = 0.851 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.170 \text{ kVA} = 1.064 \text{ KvA}$$

- **Clarificación - Evaporación:**

Este circuito cuenta con 5 CCM's:

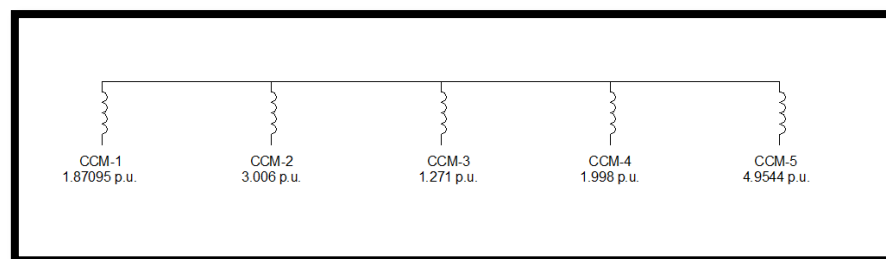
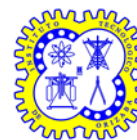
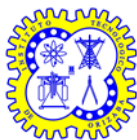


Imagen 3.3. 10

Diagrama circuito Clarificación-Evaporación.



- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 17

Valores instalados en el ccm 1. Clarificación-Evaporación.

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.87095 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.87095} = 0.5344$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.5344 \cdot 2624.39 = 1.402 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.402 = 1.753 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.402 \text{ kA} = 1.068 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.068 \text{ kVA} = 1.336 \text{ KvA}$$

- **Para el ccm-2:**

Tabla 3.3. 18

Valores instalados en el ccm 2. Clarificación-Evaporación.

kVA base:	2000 Kva
Kv:	0.44 kV
Z%:	3.006 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{3.006} = 0.332$$



Corriente de cortocircuito simétrica = $0.332 * 2624.39 = 0.872 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 0.872 = 1.091 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc \text{ sim}} = 1.732 * 0.44 * 0.872 \text{ kA} = 0.665 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc \text{ asim}} = 1.25 * 0.665 \text{ kVA} = 0.831 \text{ KvA}$

- **Para el ccm-3:**

Tabla 3.3. 19

Valores instalados en el ccm 3. Clarificación-Evaporación

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.271 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} * 0.44} = 2624.39$$

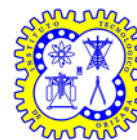
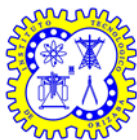
$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.271} = 0.78637$$

Corriente de cortocircuito simétrica = $0.78637 * 2624.39 = 2.063 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 2.063 = 2.579 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc \text{ sim}} = 1.732 * 0.44 * 2.063 \text{ kVA} = 1.572 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc \text{ asim}} = 1.25 * 1.572 \text{ kA} = 1.965 \text{ KvA}$



- **Para el ccm-4:**

Tabla 3.3. 20

Valores instalados en el ccm 4. Clarificación-Evaporación

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.998 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.998} = 0.500$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.500 \cdot 2624.39 = 1.312 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.312 = 1.641 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.312 \text{ kA} = 1.005 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.005 \text{ kVA} = 1.250 \text{ KvA}$$

- **Para el ccm-5:**

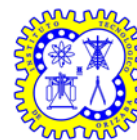
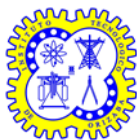
Tabla 3.3. 21

Valores instalados en el ccm 5. Clarificación-Evaporación

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	4.9544 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{4.9544} = 0.20184$$



Corriente de cortocircuito simétrica = $0.20184 * 2624.39 = 0.529 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 0.529 = 0.662 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc \text{ sim}} = 1.732 * 0.44 * 0.529 \text{ kA} = 0.403 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc \text{ asim}} = 1.25 * 0.403 \text{ kVA} = 0.504 \text{ KvA}$

- **Bus No.3:**

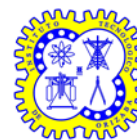
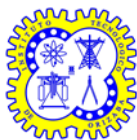
Para obtener los valores de los diversos circuitos que conforman el bus No.3 se siguió el procedimiento realizado con los circuitos anteriores.

- **Circuito oficinas administrativas. Bus 3:**

Tabla 3.3. 22

Valores instalados en el circuito oficinas administrativas

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	97.25 H.P.	85.34 KVA	5.8582 p.u.
CCM-2	102.5 H.P.	89.97 KVA	5.5581 p.u.
Total:	199.75 H.P.	175.31 KVA	2.852 p.u.



- **Circuito Cristalización. Bus 3:**

Tabla 3.3. 23

Valores instalados en el circuito cristalización.

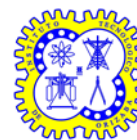
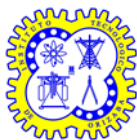
Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	346 H.P.	303.665 KVA	0.646 p.u.
CCM-2	183 H.P.	160.609 KVA	3.1131 p.u.
Total:	854 H.P.	760 KVA	1.07695 p.u.

- **Circuito bombas de inyección. Bus 3:**

Tabla 3.3. 24

Valores instalados en el circuito bombas de inyección.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	410 H.P.	359.835 KVA	1.389 p.u.
Total:	410 H.P.	359.835 KVA	1.389 p.u.



- **Bombas de rechace. Bus 3:**

Tabla 3.3. 25

Valores instalados en el circuito bombas de rechace.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	1050 H.P.	921.529 KVA	0.54257 p.u.
Total:	1050 H.P.	921.529 KVA	0.54257 p.u.

Los resultados obtenidos son presentados a continuación:

- **Oficinas administrativas.**

A este circuito pertenece el CCM de laboratorio químico, y el CCM del taller mecánico.

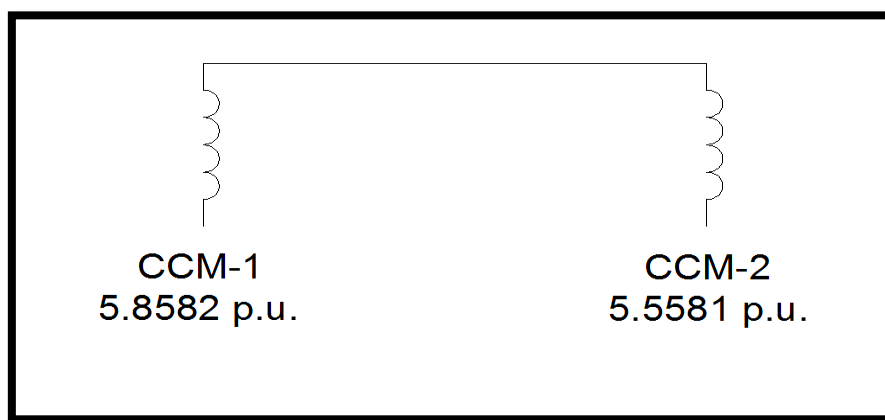
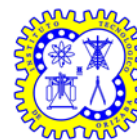
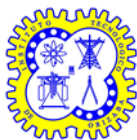


Imagen 3.3. 11

Diagrama circuito oficinas administrativas.



- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 26

Valores instalados en el ccm 1. Oficinas administrativas

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	5.8582 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{5.8582} = 0.1707$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.1707 \cdot 2624.39 = 0.447 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 0.447 = 0.559 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 0.447 \text{ kA} = 0.341 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 0.341 \text{ kVA} = 0.426 \text{ kVA}$$

- **Para el ccm-2:**

Tabla 3.3. 27

Valores instalados en el ccm 2. Oficinas administrativas.

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	5.5581 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{5.5581} = 0.1799$$



Corriente de cortocircuito simétrica = $0.1799 * 2624.39 = 0.472 \text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 0.472 = 0.590 \text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc \text{ sim}} = 1.732 * 0.44 * 0.472 \text{ kA} = 0.359 \text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc \text{ asim}} = 1.25 * 0.359 \text{ kVA} = 0.449 \text{ KvA.}$

- **Circuito cristalización:**

Este circuito está conformado por 2 CCM's.

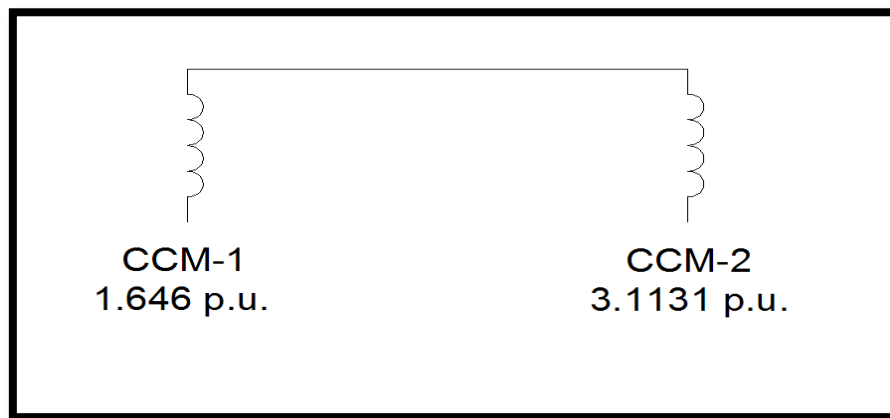


Imagen 3.3. 12

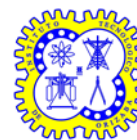
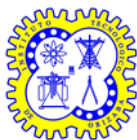
Diagrama circuito cristalización.

- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 28

Valores instalados en el ccm 1. Cristalización.

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.646 p.u.



$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{1.646} = 0.6073$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.6073 \cdot 2624.39 = 1.593 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.593 = 1.992 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.593 \text{ kA} = 1.214 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.214 \text{ kVA} = 1.518 \text{ KvA}$$

- **Para el ccm-2:**

Tabla 3.3. 29

Valores instalados en el ccm 2. Cristalización.

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	3.1131 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{3.1131} = 0.3212$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.3212 \cdot 2624.39 = 0.843 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 0.843 = 1.053 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 0.843 \text{ kA} = 0.642 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 0.642 \text{ kVA} = 0.803 \text{ Kv}$$



- **Bombas de inyección:**

Este circuito se encuentra conformado por un único CCM.

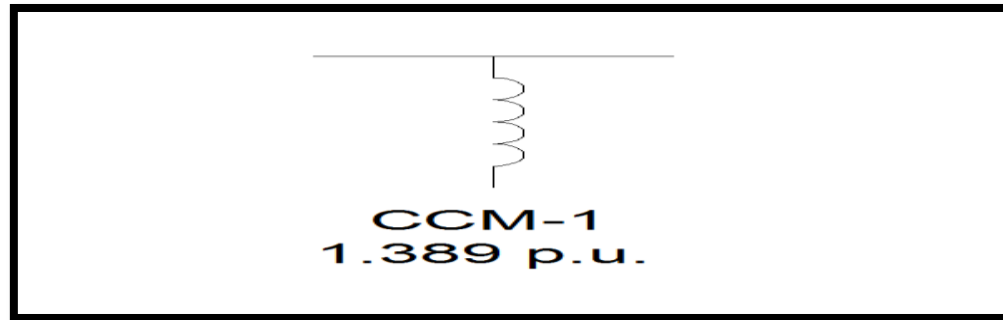


Imagen 3.3. 13

Diagrama circuito bombas de inyección.

- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 30

Valores instalados en el circuito bombas de inyección.

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	1.389 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{31.389} = 0.7196$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 0.7196 \cdot 2624.39 = 1.888 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 1.888 = 2.360 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 1.888 \text{ kA} = 1.438 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 1.438 \text{ kVA} = 1.798 \text{ kVA}$$



- **Bombas de rechace:**

Este circuito, al igual que el circuito anterior cuenta con un solo CCM.

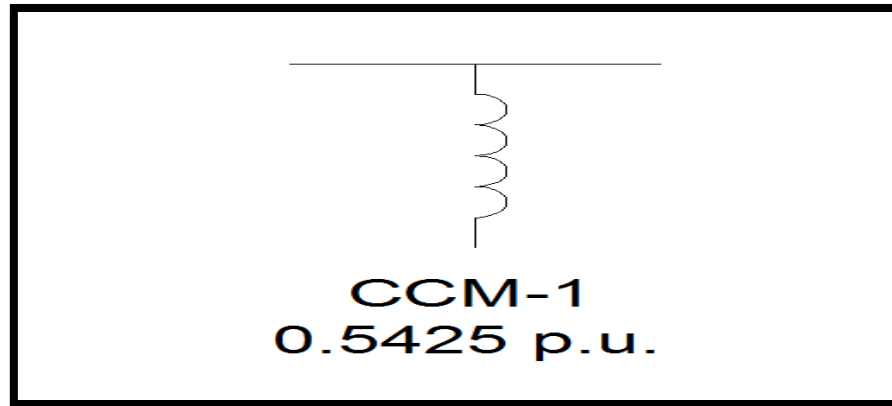


Imagen 3.3. 14

Diagrama circuito bombas de rechace.

- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 31

Valores instalados en el ccm 1. Bombas de rechace

Kva base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.5425 p.u.

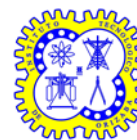
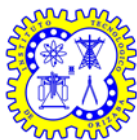
$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.5425} = 1.8430$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.8430 \cdot 2624.39 = 4.836 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 4.836 = 6.046 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 4.836 \text{ kA} = 3.686 \text{ kVA}$$



Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc} \text{ asim} = 1.25 * 3.686 \text{ kVA} = 4.607 \text{ KvA}$

- **Subestación centrifugas.**

Esta subestación alimenta a los circuitos de centrifugas de A y centrifugas de B y C.

- **Circuito Centrifugas de B y C.**

Tabla 3.3. 32

Valores instalados en el circuito centrifugas de B y C.

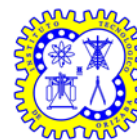
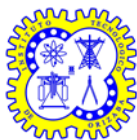
Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	1791.25 H.P.	1695.26 KVA	0.29535 p.u.
Total:	1791.25 H.P.	1695.26 KVA	0.29535 p.u.

- **Circuito Centrifugas de “A”.**

Tabla 3.3. 33

Valores instalados en el circuito Centrifugas de A.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	1533 H.P.	1126.138 KVA	0.44521 p.u.
CCM-2	575 H.P.	615.729 KVA	1.32264 p.u.
Total:	2108 H.P.	1751.186 KVA	0.3340p.u.



- **Circuito centrifugas de B y C.**

Este circuito cuenta con un solo CCM.:

- **Para el ccm-1:**

Tabla 3.3. 34

Valores instalados en el ccm 1. Centrifugas de B y C.

kVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.2949 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.2949} = 3.3905$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 3.3905 \cdot 2624.39 = 8.898 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 8.898 = 11.122 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 8.898 \text{ kA} = 6.781 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 6.781 \text{ kVA} = 8.476 \text{ KvA}$$

- **Circuito centrifugas de A.**

Este circuito cuenta con 2 CCM's.

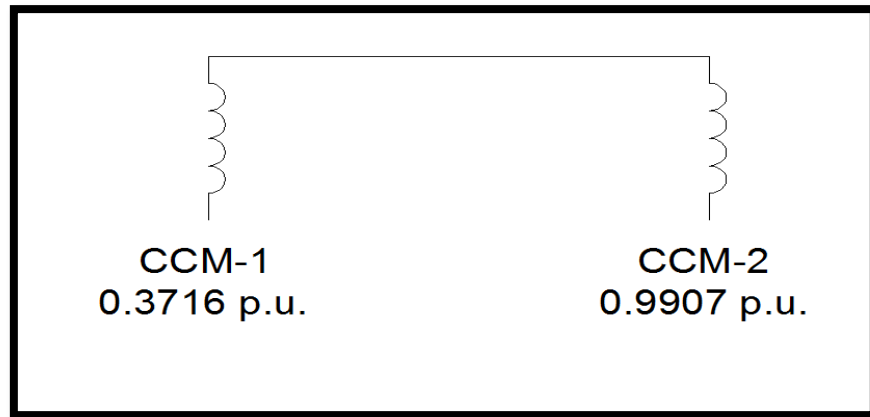


Imagen 3.3. 15

Diagrama circuito centrifugas de A.

- Para el ccm-1:

Tabla 3.3. 35

Valores instalados en el ccm 1.Centrifugas de A.

KVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.3716 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.3716} = 2.6908$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 2.6908 \cdot 2624.39 = 7.061 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 7.061 = 8.827 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 7.061 \text{ kA} = 5.381 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 5.381 \text{ kVA} = 6.727 \text{ kVA}$$



- Para el ccm- 2:

Tabla 3.3. 36

Valores instalados en el ccm 2. Centrifugas de A.

KVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.9907 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.9907} = 1.009$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.009 \cdot 2624.39 = 2.648 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 2.648 = 3.310 \text{ kA}$$

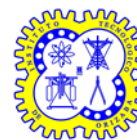
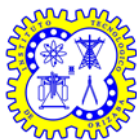
$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 2.648 \text{ kA} = 2.018 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 2.018 \text{ kVA} = 2.5225 \text{ kVA}$$

- **Subestación Molino 1.**

Esta subestación alimenta a los motores que mueven a las masas que conforman el molino No.1

A su vez, esta subestación se compone de 2 CCM's.



- **Molino 1:**

Tabla 3.3. 37

Valores instalados en el circuito molino 1.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	964 H.P.	838.288 KVA	0.5964 p.u.
CCM-2	964 H.P.	861.150 KVA	0.5806 p.u.
Total:	1928 H.P.	1699.43 KVA	0.29421 p.u.

- **Para el ccm- 1:**

Tabla 3.3. 38

Valores instalados en el ccm 1. Molino 1.

KVA base:	2000 KVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.5964 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.5964} = 1.6765$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.6765 \cdot 2624.39 = 4.399 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 4.399 = 5.499 \text{ kA}$$



Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc\ sim} = 1.732 * 0.44 * 4.399\text{kA} = 3.35\text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc\ asim} = 1.25 * 3.35\text{ kVA} = 4.190\text{ KvA}$

- **Para el ccm- 2:**

Tabla 3.3. 39

Valores instalados en el ccm 2. Molino 1.

KVA base:	2000 KVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.5806 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} * 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc\ p.\ u.} = \frac{1}{0.5806} = 1.7223$$

Corriente de cortocircuito simétrica = $1.7223 * 2624.39 = 4.5199\text{ kA}$

Corriente de cortocircuito asimétrica = $1.25 * 4.399 = 5.649\text{ kA}$

Potencia de cortocircuito simétrica = $P_{cc\ sim} = 1.732 * 0.44 * 4.5199\text{ kA} = 3.444\text{ kVA}$

Potencia de cortocircuito asimétrica = $P_{cc\ asim} = 1.25 * 3.444\text{ kVA} = 4.305\text{ KvA}$

• **Subestación Molino 6:**

Esta subestación alimenta a los motores que mueven a las masas que conforman el molino No.6

A su vez, esta subestación se compone de 2 CCM's. en este trabajo solo se presenta el cálculo de cortocircuito del primer CCM, ya que como se puede apreciar en la tabla 3.3.40 estos cuentan con valores iguales.

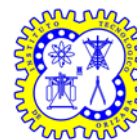
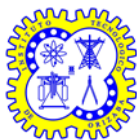


Tabla 3.3. 40

Valores instalados en el circuito molino 6.

Equipo:	Capacidad H.P.	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
CCM-1	750 H.P.	571.56 KVA	0.8747 p.u.
CCM-2	750 H.P.	571.56 KVA	0.8747 p.u.
Total:	1500 H.P.	1143.12 KVA	0.4373p.u.

- **Para el ccm- 1:**

Tabla 3.3. 41

Valores instalados en el ccm 1. Molino 6

KVA base:	2000 kVA
Kv:	0.44 kV
Z%:	0.8747 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 0.44} = 2624.39$$

$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.8747} = 1.143$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.143 \cdot 2624.39 = 2.999 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 2.999 = 3.749 \text{ kA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 0.44 \cdot 2.999 \text{ kA} = 2.285 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 2.285 \text{ kVA} = 2.856 \text{ KvA}$$



- **Subestación Bomba de agua.**

Esta subestación alimenta al motor que mueve la bomba sultzer.

Tabla 3.3. 42

Valores instalados en el circuito bomba sultzer.

Equipo:	Capacidad KVA:	Reactancia equivalente:
Bomba de agua.	526.58 KVA	0.76949 p.u.
Total:		0.76949 p.u.

- **Para la bomba:**

Tabla 3.3. 43

Valores instalados en el ccm 1. Bomba sultzer.

KVA base:	2000 kVA
Kv:	4.16 kV
Z%:	0.76949 p.u.

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 4.16} = 277.58$$

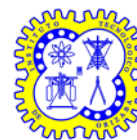
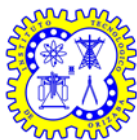
$$I_{cc \text{ p. u.}} = \frac{1}{0.76949} = 1.299$$

$$\text{Corriente de cortocircuito simétrica} = 1.299 \cdot 277.58 = 0.360 \text{ kA}$$

$$\text{Corriente de cortocircuito asimétrica} = 1.25 \cdot 0.360 = 0.450 \text{ Ka}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito simétrica} = P_{cc \text{ sim}} = 1.732 \cdot 4.16 \cdot 0.360 \text{ kA} = 2.593 \text{ kVA}$$

$$\text{Potencia de cortocircuito asimétrica} = P_{cc \text{ asim}} = 1.25 \cdot 2.593 \text{ kVA} = 3.24 \text{ KvA}$$



CAPÍTULO IV:

OPTIMIZACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS.

4.1 INTRODUCCIÓN:

En el capítulo anterior, se presentó el análisis de cortocircuito realizado a los diversos equipos y CCM's que conforman el sistema eléctrico de Central Motzorongo S.A. de C.V. basándose en los resultados obtenidos, en este capítulo se presentan las protecciones utilizadas en los equipos antes analizados, con la finalidad de determinar si son las adecuadas.

4.2 BUS No. 1:

4.2.1 CIRCUITO CALDERAS:

Tabla 4.2.1 1

Valores de cortocircuito. Calderas

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	1372 H.P.
kVA instalados:	1023.51 kVA
Corriente instalada:	1580.056 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	6.320 kA

- Interruptor del alimentador principal utilizado:

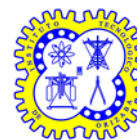
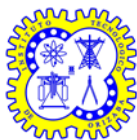


Tabla 4.2.1 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito calderas.

Interruptor Federal Pacific:	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	50 kA

De acuerdo a la corriente total instalada en el circuito se determinó que el interruptor instalado no es el adecuado, ya que está muy próximo a alcanzar su capacidad nominal.

Por lo tanto se recomienda sustituirlo, por uno con una capacidad nominal mínima de 2500 Amp, y una capacidad interruptiva de 25 KA. Esto de acuerdo a la ecuación mostrada a continuación.

$$I \text{ nominal del interruptor: } 1580.056 * 1.5 = 2370.084 \text{ Amp.}$$

La capacidad interruptiva mostrada en la tabla 4.2.1.1 se tomó en cuenta al elegir la capacidad del interruptor requerido, sugiriendo un ajuste de tiempo en el disparo.

El factor 1.5 se toma como referencia para cubrir futuros incrementos en la carga del circuito.

4.2.1.1 CCM-1. CIRCUITO CALDERAS:

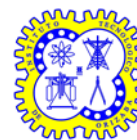
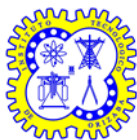


Tabla 4.2.1.1. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Calderas.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	838 H.P.
kVA instalados:	753.021 kVA
Corriente instalada:	988 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	3.952 kA

- **Interruptor utilizado:**

Tabla 4.2.1.1. 2

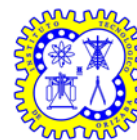
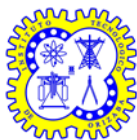
Valores correspondientes al interruptor del ccm 1. Calderas.

Interruptor termomagnético Square D:	
Corriente nominal:	1200 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

En este CCM el interruptor principal cuenta con la capacidad nominal apropiada, de acuerdo a los amperes totales instalados en el mismo, sin embargo, para un incremento futuro de carga se recomienda sustituirlo por uno con capacidad mínima de 1500 Amp, de acuerdo a la ecuación siguiente.

$$I \text{ nominal del interruptor: } 988 \text{ Amp} * 1.5 = 1482 \text{ Amp.}$$

Es importante mencionar que la capacidad interruptiva del dispositivo de protección es elevada, respecto a la corriente de cortocircuito de este ccm, sin embargo, para lograr una protección efectiva se ajusta el tiempo de disparo del dispositivo.



4.2.1.2 CCM-2. CIRCUITO CALDERAS.

Tabla 4.2.1.2. 1

Valores de cortocircuito ccm 2. Calderas.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	534 H.P.
kVA instalados:	468.66 kVA
Corriente instalada:	614.979Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	2.459.898 KA

- Interruptor utilizado:

Tabla 4.2.1.2. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 2.Calderas.

Interruptor termomagnético Square D:	
Corriente nominal:	1200 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

El interruptor principal instalado en este CCM cuenta con la capacidad nominal óptima para proteger el mismo. Para lograr una protección eficiente es necesario ajustar el tiempo de disparo.

4.2.2 CIRCUITO BOMBAS DE PETRÓLEO:

Este circuito perteneciente al bus 1 cuenta con las siguientes características.

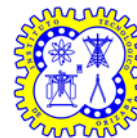


Tabla 4.2.2. 1

Valores de cortocircuito. Bombas de petróleo.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	265.75 H.P.
kVA instalados:	256.75 kVA
Corriente instalada:	306.050 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.343 kA

- **Interruptor del alimentador principal utilizado:**

Tabla 4.2.2. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de petróleo.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	2000 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Se determinó que el interruptor instalado cuenta con la capacidad nominal para proteger el circuito, y para soportar futuros incrementos en el mismo.

Al igual que en el caso anterior, se recomienda ajustar el tiempo de disparo para lograr una protección eficiente.

4.2.3 CCM-1. CIRCUITO BOMBAS DE PETRÓLEO.

Como se había mencionado en el capítulo anterior, este circuito cuenta con un único CCM. Las características del mismo son presentadas a continuación.

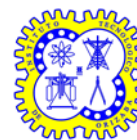
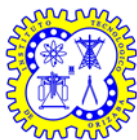


Tabla 4.2.3. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Bombas de petróleo.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	265.75 H.P.
kVA instalados:	256.75 kVA
Corriente instalada:	306.50 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.343 KA

- **Interruptor utilizado:**

Tabla 4.2.3. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 1. Bbas de petróleo.

Interruptor termomagnético Square D:	
Corriente nominal:	2000 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	100 kA

De acuerdo a los datos presentados en las tablas 4.2.3.1 y 4.2.3.2 se determinó que el interruptor instalado cuenta con una capacidad nominal elevada, sin embargo es adecuado para incrementos futuros.

4.2.4 CIRCUITO BOMBAS DE AGUA:

El circuito de bombas de agua cuenta con las siguientes características:

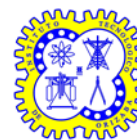
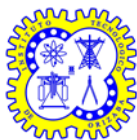


Tabla 4.2.4. 1

Valores de cortocircuito. Bombas de agua.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	635 H.P.
kVA instalados:	567.301 kVA
Corriente instalada:	731.265 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	2.977 kA

- **Interruptor del alimentador principal utilizado:**

Tabla 4.2.4. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de agua.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Este circuito cuenta con un tablero, en el cual se encuentran concentrados los equipos pertenecientes al mismo, sin embargo, este no cuenta con un interruptor principal, es decir, la alimentación de los equipos es tomada desde el tablero en donde se ubica el interruptor principal del mismo, esto representa grandes inconvenientes, ya que si el interruptor principal opera, los equipos pertenecientes al circuito dejarán de funcionar.

Por lo tanto, se recomienda la implementación de un interruptor, el cual cuente con las siguientes características:

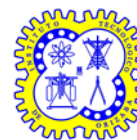
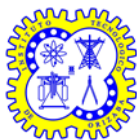


Tabla 4.2.4. 3

Valores del interruptor requerido. Bbas. de agua.

Interruptor	
Corriente nominal:	1000 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

La corriente nominal, se determinó de acuerdo a la siguiente operación:

$$I_{\text{nominal del interruptor}}: 731.265 * 1.5 = 1096.89 \text{ Amp.}$$

Para poder determinar la capacidad nominal del interruptor mostrado en la tabla 4.2.4.3 sólo se tomó en cuenta la corriente instalada mostrada en la tabla 4.2.4.2.

Debido a que la capacidad interruptiva del dispositivo de protección es elevada de acuerdo con el circuito a proteger, se determinó ajustar el tiempo de disparo, para lograr una protección eficiente del mismo.

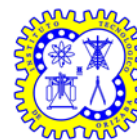
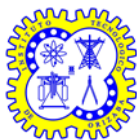
Este procedimiento se repitió al calcular los demás dispositivos presentados más adelante.

4.3 BUS NO.2:

A este bus pertenecen los siguientes circuitos:

- Circuito Batey-Molinos.
- Circuito Clarificación- Evaporación.
- Circuito manejo de azúcar.

Las características de cada circuito serán descritas a continuación.



4.3.1 CIRCUITO BATEY-MOLINOS:

Tabla 4.3.1. 1

Valores de cortocircuito. Batey-Molinos.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	1213.5 H.P.
kVA instalados:	1065 kVA
Corriente instalada:	1391.189Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	5.935 kA

- Interruptor del interruptor principal utilizado:

Tabla 4.3.1. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito Batey-Molinos

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

El interruptor principal instalado en este circuito cuenta con las características nominales apropiadas, sin embargo, se recomienda sustituirlo, a fin de evitar interrupciones innecesarias en el circuito.

El interruptor requerido debe contar con las siguientes características.

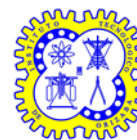
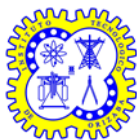


Tabla 4.3.1. 3

Valores del interruptor requerido. Batey-Molinos.

Interruptor	
Corriente nominal:	2000 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $1391.189 * 1.5 = 2086.78\text{Amp.}$

4.3.1.1CCM-1. CIRCUITO BATEY-MOLINOS:

Tabla 4.3.1.1. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Batey-Molinos.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	231.5 H.P.
kVA instalados:	203.175 kVA
Corriente instalada:	266.606 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.066 kA

- Interruptor utilizado:

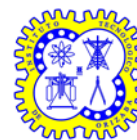
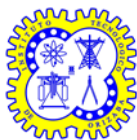


Tabla 4.3.1.1. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 1.Batey-Molinos.

Fusibles Mercury	
Corriente nominal:	200 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	10 kA

Como se puede observar, el interruptor presentado en la tabla 4.3.1.1.2 no es el adecuado para cubrir las necesidades del CCM-1.

Por lo tanto, se recomienda sustituirlo, de acuerdo con las siguientes características.

Tabla 4.3.1.1. 3

Valores del interruptor requerido ccm 1.Batey-Molinos.

Interruptor	
Corriente nominal:	400 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

$$I_{\text{nominal del interruptor}} = 266.606 * 1.5 = 399.909 \text{ Amp}$$

4.3.1.2 CCM-2. CIRCUITO BATEY-MOLINOS:

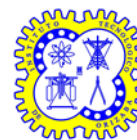
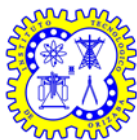


Tabla 4.3.1.2. 1

Valores de cortocircuito ccm 2. Batey-Molinos.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	406 H.P.
kVA instalados:	356.324 kVA
Corriente instalada:	467.568 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.870 kA

Este ccm, no cuenta con interruptor principal, es decir, la alimentación es tomada desde el tablero en donde se encuentra el interruptor principal del circuito.

Debido a esto, se recomienda instalar un interruptor con las siguientes características.

Tabla 4.3.1.2. 2

Valores del interruptor requerido ccm 2.Batey-Molinos.

Interruptor	
Corriente nominal:	800 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

4.3.1.3 CCM-3. CIRCUITO BATEY-MOLINOS:

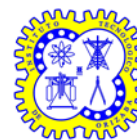
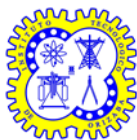


Tabla 4.3.1.3. 1

Valores de cortocircuito ccm 3. Batey-Molinos.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	333.5 H.P.
kVA instalados:	292.695 kVA
Corriente instalada:	384.74 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.536 kA

- **Interruptor utilizado:**

Tabla 4.3.1.3. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 3. Batey-Molinos.

Interruptor termomagnético Square D	
Corriente nominal:	1000 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

De acuerdo a los datos presentados en las tablas 4.3.1.3.1 y 4.3.1.3.2 se determinó que el interruptor instalado cuenta con las características nominales adecuadas.

4.3.1.4 CCM-4. CIRCUITO BATEY-MOLINOS:

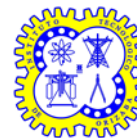


Tabla 4.3.1.4. 1

Valores de cortocircuito ccm 4.Batey-Molinos.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	242.5 H.P.
kVA instalados:	212.82 kVA
Corriente instalada:	279.274Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.117 kA

- **Interruptor utilizado:**

Tabla 4.3.1.4. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 4. Batey-Molinos.

Interruptor termomagnético Square D	
Corriente nominal:	1000 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Se determinó que el interruptor instalado en este ccm cuenta con las características nominales adecuadas.

4.3.2 CIRCUITO CLARIFICACIÓN - EVAPORACIÓN:

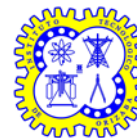


Tabla 4.3.2. 1

Valores de cortocircuito. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	1342 H.P.
kVA instalados:	1177.79 kVA
Corriente instalada:	1545.10Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	5.742 kA

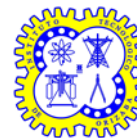
- **Interruptor del alimentador principal utilizado:**

Tabla 4.3.2. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito Clarificación-Evaporación.

Interruptor Federal Pacific	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	50 kA

En este caso, se recomienda sustituir al interruptor descrito en la tabla 4.3.2.2 debido a que su capacidad nominal esta pronta a ser superada, causando interrupciones innecesarias en el circuito.



4.3.2.1 CCM -1. CIRCUITO CLARIFICACIÓN-EVAPORACIÓN:

Tabla 4.3.2.1. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	304.4 H.P.
kVA instalados:	267.243 kVA
Corriente instalada:	350.676 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.402 kA

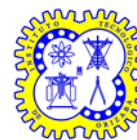
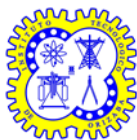
Este ccm no cuenta con interruptor principal, por lo cual se recomienda su implementación, con las características descritas a continuación.

Tabla 4.3.2.1. 2

Valores del interruptor requerido ccm 1. Clarificación—Evaporación.

Interruptor	
Corriente nominal:	500 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $350.676 * 1.5 = 526.01$ Amp.



4.3.2.2 CCM-2. CIRCUITO CLARIFICACIÓN-EVAPORACIÓN:

Tabla 4.3.2.2. 1

Valores de cortocircuito ccm 2. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	189.5 H.P.
kVA instalados:	166.314 kVA
Corriente instalada:	218.237Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	872.947 Amp.

- Interruptor utilizado:

Tabla 4.3.2.2. 2

Valores correspondientes al interruptor del ccm 2. Clarificación-Evaporación.

Fusibles Mercury.	
Corriente nominal:	200 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	10 kA

Como se puede observar, el interruptor no cuenta con la demanda requerida por este ccm, por lo que se recomienda reemplazarlo, de acuerdo a las siguientes características.

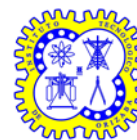
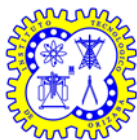


Tabla 4.3.2.2. 3

Valores del interruptor requerido ccm 2. Clarificación-Evaporación.

Interruptor Termomagnético	
Corriente nominal:	400 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	10 kA

I nominal del interruptor: $218.237 * 1.5 = 327.35$ Amp.

4.3.2.3 CCM-3. CIRCUITO CLARIFICACIÓN-EVAPORACIÓN:

Tabla 4.3.2.3. 1

Valores de cortocircuito ccm 3. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	448 H.P.
kVA instalados:	393.185 kVA
Corriente instalada:	515.93 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	2.063 kA

Este ccm no cuenta con interruptor principal, por lo cual es necesario solicitarlo, tomando en cuenta las siguientes características.

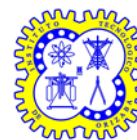
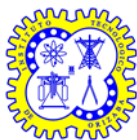


Tabla 4.3.2.3. 2

Valores del interruptor requerido ccm 3. Clarificación-Evaporación.

Interruptor.	
Corriente nominal:	800 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $515.93 * 1.5 = 773.89$ Amp.

4.3.2.4 CCM-4 CIRCUITO CLARIFICACIÓN-EVAPORACIÓN.

Tabla 4.3.2.4. 1

Valores de cortocircuito ccm 4. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	115 H.P.
kVA instalados:	100.92 kVA
Corriente instalada:	132.439 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	529.708 Amp

Este ccm, al igual que el anterior no cuenta con interruptor principal, por lo cual es necesario solicitarlo, tomando en cuenta las siguientes características.

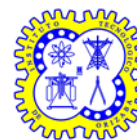
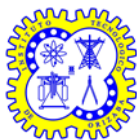


Tabla 4.3.2.4. 2

Valores del interruptor requerido ccm 4. Clarificación-Evaporación.

Interruptor termomagnético	
Corriente nominal:	200 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

4.3.2.5 CCM-5. CIRCUITO CLARIFICACIÓN-EVAPORACIÓN.

Tabla 4.3.2.5. 1

Valores de cortocircuito ccm 5. Clarificación-Evaporación.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	285 H.P.
kVA instalados:	250.129 kVA
Corriente instalada:	328.219Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.312 kA

Este ccm no cuenta con interruptor principal, por lo que la implementación de este dispositivo es necesaria. Este dispositivo debe contar con las siguientes características:

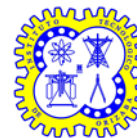


Tabla 4.3.2.5. 2

Valores del interruptor requerido ccm 5. Clarificación-Evaporación.

Interruptor termomagnético	
Corriente nominal:	500 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $328.219 * 1.5 = 492.32$ Amp.

4.3.3 CIRCUITO MANEJO DE AZÚCAR:

Tabla 4.3.3. 1

Valores de cortocircuito. Manejo de azúcar.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	386.207 H.P.
kVA instalados:	339.21 kVA
Corriente instalada:	444.774Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.780 kA

- Interruptor del interruptor principal utilizado:

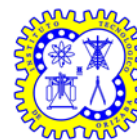
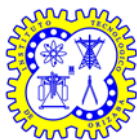


Tabla 4.3.3. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito manejo de azúcar.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Este circuito cuenta con un único ccm, el cual cuenta con las características descritas en la tabla 4.3.3.1

El interruptor instalado en el ccm cuenta con las sig. Características:

Tabla 4.3.3. 3

Valores correspondientes al ccm 1. Manejo de azúcar.

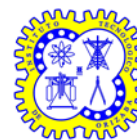
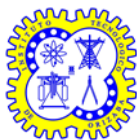
Interruptor termomagnético Square D	
Corriente nominal:	800 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

De acuerdo a los datos mostrados en las tablas anteriores, se determinó que la capacidad interruptiva es adecuada.

4.4 BUS. NO.3:

Este bus alimenta los siguientes circuitos:

- oficinas administrativas.
- cristalización.



- bombas de inyección.
- bombas de rechace.

4.4.1 OFICINAS ADMINISTRATIVAS.

Las características de este circuito son mostradas a continuación.

Tabla 4.4.1. 1

Valores de cortocircuito. Oficinas administrativas.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	199.75 H.P.
kVA instalados:	175.308 kVA
Corriente instalada:	230.41 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	920.155 Amp.

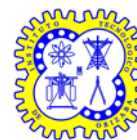
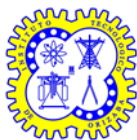
- **Interruptor del alimentador principal instalado:**

Tabla 4.4.1. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito oficinas administrativas.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

De acuerdo a los datos presentados, se determina que el interruptor instalado cuenta con características adecuadas para proteger el circuito.



4.4.1.1CCM-1. (LABORATORIO QUIMICO). CIRCUITO OFICINAS ADMINISTRATIVAS.

Tabla 4.4.1.1. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Oficinas administrativas.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	97.25 H.P.
kVA instalados:	85.35 kVA
Corriente instalada:	111.997Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	447.984 Amp

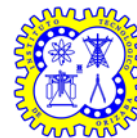
Este ccm, no cuenta con interruptor principal, por lo cual es necesario solicitarlo, tomando en cuenta las siguientes características.

Tabla 4.4.1.1. 2

Valores del interruptor requerido ccm 1. Oficinas administrativas.

Interruptor termomagnético	
Corriente nominal:	200 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $111.997 * 1.5 = 167.99$ Amp.



4.4.1.2 CCM-2. (TALLER MECÁNICO). CIRCUITO OFICINAS ADMINISTRATIVAS.

Tabla 4.4.1.2. 1

Valores de cortocircuito ccm 2. Oficinas administrativas.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	102.5 H.P.
kVA instalados:	89.958 kVA
Corriente instalada:	118.043 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	479.170 Amp.

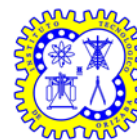
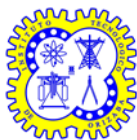
Este ccm, no cuenta con interruptor principal, por lo cual es necesario solicitarlo, tomando en cuenta las siguientes características.

Tabla 4.4.1.2. 2

Valores del interruptor requerido ccm 2. Oficinas administrativas.

Interruptor	
Corriente nominal:	200 Amp.
Voltaje nominal:	600 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

$I_{\text{nominal del interruptor}} = 118.043 * 1.5 = 177.64 \text{ Amp.}$



4.4.2 CIRCUITO CRISTALIZACIÓN:

Tabla 4.4.2. 1

Valores de cortocircuito. Circuito cristalización.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	529 H.P.
kVA instalados:	464.274 kVA
Corriente instalada:	609.221Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	2.436 Amp.

- Interruptor del alimentador principal utilizado:

Tabla 4.4.2. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito cristalización.

Interruptor Federal Pacific.	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	50 kA

Se determinó que el interruptor es el apropiado para proteger el circuito.

4.4.2.1 CCM-1. CIRCUITO CRISTALIZACIÓN:

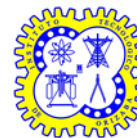


Tabla 4.4.2.1. 1

Valores de cortocircuito ccm 1. Cristalización.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	346 H.P.
kVA instalados:	303.665 kVA
Corriente instalada:	398.469 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.593 kA

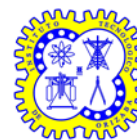
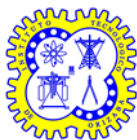
Este ccm no cuenta con interruptor principal, por lo cual se recomienda adquirir uno, con las siguientes características.

Tabla 4.4.2.1. 2

Valores del interruptor requerido ccm 1. Cristalización.

Interruptor	
Corriente nominal:	600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $398.469 * 1.5 = 597.70$ Amp.



4.4.2.2 CCM-2. CIRCUITO CRISTALIZACIÓN.

Tabla 4.4.2.2. 1

Valores de cortocircuito ccm 2. Cristalización.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	183 H.P.
kVA instalados:	160.609 kVA
Corriente instalada:	210.751 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	843.003 Amp.

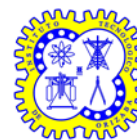
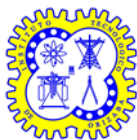
Este ccm, al igual que el anterior, no cuenta con interruptor principal, por lo cual se recomienda adquirir uno, con las siguientes características.

Tabla 4.4.2.2. 2

Valores del interruptor requerido ccm 2. Cristalización.

Interruptor	
Corriente nominal:	350 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $210.751 * 1.5 = 316.126$ Amp.



4.4.3 CIRCUITO BOMBAS DE INYECCIÓN:

Este circuito perteneciente al bus 3 cuenta con las siguientes características.

Tabla 4.4.3. 1

Valores de cortocircuito. Circuito bombas de inyección.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	410 H.P.
kVA instalados:	359.835 kVA
Corriente instalada:	472.175Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	1.886 KA

- **interruptor del alimentador principal instalado:**

Tabla 4.4.3. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de inyección.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Este circuito cuenta con un solo ccm, con las características descritas en la tabla 4.4.3.1

Este no cuenta con interruptor principal. La adquisición de este, debe de contar con las siguientes características.

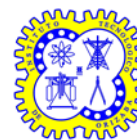
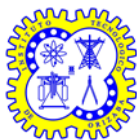


Tabla 4.4.3. 3

Valores del interruptor requerido ccm 1. Bbas. de inyección.

Interruptor	
Corriente nominal:	800 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $472.175 * 1.5 = 708.26$ Amp.

4.4.4 CIRCUITO BOMBAS DE RECHACE:

Tabla 4.4.4. 1

Valores de cortocircuito. Circuito bombas de rechace.

Voltaje nominal:	440 V
H.P. instalados:	1050 H.P.
kVA instalados:	921.529 kVA
Corriente instalada:	1209.22 Amp.
Corriente de cortocircuito simétrica:	4.836 kA

- **Interruptor del alimentador principal instalado:**

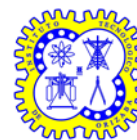
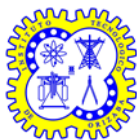


Tabla 4.4.4. 2

Valores correspondientes al interruptor del circuito bombas de rechace.

Interruptor ABB	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	440 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

Este circuito está conformado por un único ccm, el cual cuenta con las características descritas en la tabla 4.4.4.1

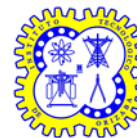
Al igual que en el caso anterior, este ccm no cuenta con interruptor principal, por lo que debe implementarse un dispositivo con las siguientes características:

Tabla 4.4.4. 3

Valores del interruptor requerido ccm 1. Bbas de rechace.

Interruptor	
Corriente nominal:	1600 Amp.
Voltaje nominal:	480 V
Corriente a interrumpir:	65 kA

I nominal del interruptor: $1209.22 * 1.5 = 1813$. Amp



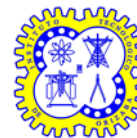
4.5 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.

La continuidad y la calidad del servicio son dos requisitos ligados al buen funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia.

La continuidad hace referencia al hecho de que el sistema eléctrico de potencia debe garantizar que la energía producida en los centros de generación sea suministrada de forma ininterrumpida a los centros de consumo. Esta característica adquiere importancia si se tiene en cuenta que la energía eléctrica, a diferencia de otros tipos de energía, no puede ser almacenada en forma significativa, por lo que una interrupción del suministro tiene repercusiones directas e inmediatas sobre los procesos que se desarrollan a partir del consumo de energía eléctrica.

El requisito de calidad se refiere a que la energía debe ser suministrada en determinadas condiciones, con el fin de garantizar que los diferentes equipos conectados a la red van a operar en las condiciones para las que han sido proyectados. Los márgenes de variación admitidos en cada magnitud (valores de onda, frecuencia, equilibrio, contenido en armónicos, etc.) son función de la sensibilidad de la instalación alimentada, pero a nivel general, se puede asegurar que el nivel de exigencia se está incrementando en los últimos años para todo tipo de instalaciones.

Cuando se produce una falla, las magnitudes asociadas al sistema alcanzan valores situados fuera de sus rangos normales de funcionamiento y determinadas áreas del sistema pueden pasar a operar en condiciones desequilibradas con el riesgo que ello conlleva para los diferentes elementos que lo integran. En caso de no tomar ningún tipo de medida en contra, la falla se propagaría a través de la red y sus efectos se irían extendiendo. Como consecuencia de todo ello, importantes zonas de la red



podrían llegar a quedar fuera de servicio y la calidad del suministro se resentiría, incluso en zonas alejadas del punto en que se ha producido la falla.

Tanto por razones técnicas como económicas, es imposible evitar que se produzcan fallas, el diseño de un sistema eléctrico debe contemplar el hecho de que van a producirse fallas de manera aleatoria e inesperada, por lo que es necesario dotarlo de los medios adecuados para su protección. Por esta razón, los sistemas eléctricos de potencia incorporan un sistema de protección que tiene por objeto minimizar los efectos derivados de los diferentes tipos de fallas que pueden producirse.

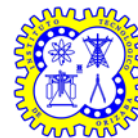
La actuación del sistema de protección va encaminada, por tanto, a mantener tanto la calidad como la continuidad del servicio, intentando que ambas características se resientan mínimamente durante un tiempo mínimo. Para ello es necesario que la red sea planificada de manera que permita ofrecer alternativas de operación que posibiliten la adecuada alimentación de todos los puntos de consumo aunque se produzcan fallas que afecten a elementos de la generación, transmisión o distribución.

4.5.1 CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN:

Tanto un sistema de protección en su conjunto como cada una de las protecciones que lo componen, deben satisfacer las siguientes características funcionales.

- **Sensibilidad:**

La protección debe saber distinguir inequívocamente las situaciones de falla de aquellas que no lo son. Para dotar a un sistema de protección de estas características es necesario:



- Establecer para cada tipo de protección las magnitudes mínimas necesarias que permiten distinguir las situaciones de falla de las situaciones normales de operación.
- Establecer para cada una de las magnitudes necesarias las condiciones límite que separan las situaciones de falla de las situaciones normales de operación.

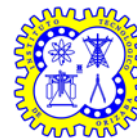
Las condiciones límite son un concepto más amplio que el de valores límite, ya que, en muchas ocasiones, el solo conocimiento del valor de una magnitud no basta para determinar si ha sido alcanzado como consecuencia de una situación anómala de funcionamiento o es el resultado de una incidencia normal dentro de la explotación del sistema.

- **Selectividad:**

La selectividad es la capacidad que debe tener la protección, para una vez detectada la existencia de falla, discernir si la misma se ha producido dentro o fuera de su área de vigilancia y, en consecuencia, dar orden de disparar los interruptores automáticos que controla, cuando así sea necesario para despejar la falla.

Si la falla se ha producido dentro del área vigilada por la protección ésta debe dar la orden de abrir los interruptores que aíslan el circuito en falla. Si por el contrario, la falla se ha producido fuera de su área de vigilancia, la protección debe dejar que sean otras protecciones las que actúen para despejarla, ya que su actuación dejaría fuera de servicio un número de circuitos más elevado que el estrictamente necesario para aislar la falla y, consecuentemente, implicaría un innecesario debilitamiento del sistema.

Existen diversas formas de dotar a las protecciones de la característica de selectividad. En algunos casos, la propia configuración de la protección hace que sea sensible ante fallas ocurridas en su área de protección y, por tanto la selectividad



resulta ser una cualidad inherente al propio funcionamiento de la protección. en los casos en que las protecciones si son sensibles a fallas ocurridas fuera de su área de vigilancia la selectividad puede lograrse mediante un adecuado ajuste de condiciones y tiempos de actuación en coordinación con el resto de protecciones relacionadas.

- **Rapidez:**

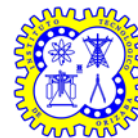
Tras haber sido detectada una falla, esta debe ser despejada lo más rápidamente posible. Cuanto menos tiempo se tarde en aislar la falla, menos se extenderán sus efectos y menores daños y alteraciones se producirán al reducirse el tiempo de permanencia bajo condiciones anómalas en los diferentes elementos. Todo ello redundará en una disminución de los tiempos de restablecimiento de las condiciones normales de operación, así como de reparación o reposición de equipos dañados, y, por tanto, en un menor tiempo de indisponibilidad de las instalaciones afectadas por la falla, lo que posibilita un mayor y mejor aprovechamiento de los recursos ofrecidos por el sistema eléctrico.

La rapidez con que puede actuar una protección depende directamente de la tecnología empleada en su construcción, y de la velocidad de respuesta del sistema de mando y control de los interruptores automáticos asociados a la misma.

Sin embargo, un despeje óptimo de la falla no exige que todas las protecciones que la detectan actúen de forma inmediata. En función de esta característica las protecciones se clasifican en:

- **Protecciones instantáneas:**

Son aquellas que actúan tan rápido como es posible debido a que la falla se ha producido dentro del área que vigilan directamente. Actualmente, el tiempo usual de despeje de una falla en alta tensión mediante una protección instantánea puede



situarse en el entorno de 2 a 3 ciclos. Si el tiempo de despeje es menor la protección se denomina de alta velocidad.

- **Protecciones de tiempo diferido o con retraso en tiempo:**

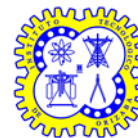
Son aquellas en las que de manera intencionada se introduce un tiempo de espera que retrasa su operación, es decir, que retrasa el inicio de la maniobra de apertura de interruptores una vez que ha sido tomada la decisión de operar. Este retraso facilita, por ejemplo, la coordinación entre protecciones con el objetivo de que actúen solamente aquellas que permiten aislar la falla desconectando la mínima parte posible del sistema.

• **Fiabilidad:**

Una protección fiable es aquella que responde siempre correctamente. Esto significa que la protección debe responder con seguridad y efectividad ante cualquier situación que se produzca.

No debe confundirse la respuesta de la protección con su actuación u operación. La protección está vigilando continuamente lo que pasa en el sistema y, por lo tanto, está respondiendo en cada instante en función de las condiciones que en él se producen. En consecuencia, la respuesta de la protección pueden ser tanto de actuación como de no actuación. Seguridad significa que no deben producirse actuaciones innecesarias ni omitirse actuaciones necesarias.

Por otra parte, cuando la protección debe actuar es necesario que todas las etapas que componen el proceso de despeje de la falla sean cumplidas con efectividad. El fallo en cualquiera de ellas implicaría que la orden de actuación dada por la protección no podría ser cumplida con la debida obediencia por el interruptor automático correspondiente.



En este sentido, es necesario resaltar la gran importancia que tiene para las protecciones un adecuado programa de mantenimiento preventivo. Se debe tener en cuenta que una protección solamente actúa en condiciones de falla y que estas condiciones son escasas y excepcionales en cualquier sistema eléctrico. Por tanto, aunque una protección a lo largo de su vida útil va a operar en escasas ocasiones, se debe tener la seguridad de que operara correctamente aunque haya transcurrido un largo periodo de tiempo desde la última vez que lo hizo.

4.5.2 Estructura de un sistema de protección:

La gran importancia de la función realizada por el sistema de protección hace aconsejable dotarlo de una gran estructura que impida que el fallo de uno cualquiera de sus equipos deje desprotegido al sistema y desencadene una serie de consecuencias indeseables.

Un equipo de protección debe cubrir mediante equipos de respaldo el posible fallo de los equipos de protección principales. Sin embargo, consideraciones de tipo económico hacen inviable la utilización de equipos de respaldo en los casos en los que la experiencia muestra que la probabilidad de producirse una falla es mínima. Por el contrario, en casos como el de la protección de líneas aéreas que soportan alrededor del 90% de las fallas que ocurren en un sistema, el establecimiento de sistemas de respaldo resulta impredecible.

Por esta razón, el sistema de protección de la red se estructura en base a:

- Protecciones primarias.
- Protecciones de respaldo.

- **Protecciones primarias:**

Las protecciones primarias son aquellas que tienen la responsabilidad de despejar la falla en primera instancia. Están definidas para desconectar el mínimo número de elementos necesarios para aislar la falla.

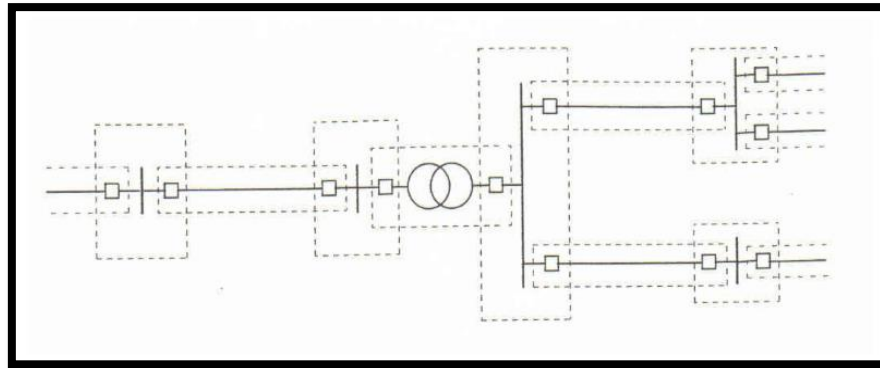
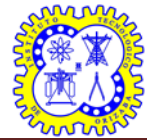


Imagen 4.5.2.1

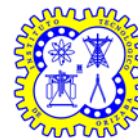
Protecciones primarias.

Con el fin de optimizar sus protecciones, el sistema eléctrico se divide en zonas de protección primaria definidas en torno a cada elemento importante, tal como se muestra en la figura anterior. Cada zona se traslapa con sus adyacentes con el fin de evitar que se produzcan zonas muertas no cubiertas por protecciones primarias. El traslape entre dos zonas se establece alrededor del interruptor común a ambas, al mismo tiempo sirve de separación entre los dos elementos contiguos correspondientes.

Cuando se produce una falla en el interior de una zona, las protecciones primarias correspondientes deben disparar los interruptores pertenecientes a la misma, pero solamente estos y ninguno más debe ser disparado para despejar la falla. Únicamente en el caso poco probable, pero posible, de que la falla se produzca en la zona traslapada, la actuación de las protecciones primarias puede llevar a desconectar un área más amplia que la estrictamente necesaria para aislar la falla.

- **Protecciones de respaldo:**

Las protecciones de respaldo son aquellas que tienen la responsabilidad de despejar la falla en segunda instancia, es decir, solamente deben operar en el caso de que hayan fallado las protecciones primarias correspondientes. por esta razón es muy importante independizar entre si las causas de fallo de la protección principal y de



respaldo, de forma tal que nada pueda producir el fallo de la protección principal sea capaz también de provocar el fallo de la protección de respaldo. Usualmente esto se consigue empleando distintos elementos y circuitos de alimentación, control, etc., en uno y otro tipo de protección.

Las protecciones de respaldo deben operar con retardo del tiempo respecto a las principales con el fin de dejarles tiempo suficiente para que puedan actuar. Una vez que se haya producido esta actuación, las protecciones de respaldo deben ser reinicializadas con el fin de impedir aperturas innecesarias de interruptores.

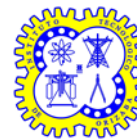
Se denomina protección de respaldo local a aquella que se ubica en la misma subestación que la protección primaria correspondiente. La duplicidad de elementos, como por ejemplo los transformadores de medida para protección que las alimentan, se hace impredecible en algunos casos si se quiere conseguir independizar las causas de fallo en uno y otro tipo de protección.

Cuando la protección de respaldo está instalada en una subestación contigua a la que contiene la protección principal recibe el nombre de protección de respaldo remoto. Las protecciones de respaldo remoto presentan la ventaja de separar, como consecuencia de su propia filosofía de instalación, las causas de fallo respecto a las protecciones primarias correspondientes. Sin embargo, presentan el inconveniente de que su actuación conduce siempre a la desconexión de un área de la red mayor que la estrictamente necesaria para aislar la falla.

Finalmente, es necesario señalar que una misma protección puede desempeñar funciones de protección primaria para un determinado elemento, y al mismo tiempo, funciones de protección de respaldo para otro elemento. Asimismo, cuando las protecciones primarias se encuentran fuera de servicio debido a tareas de reparación o mantenimiento, las protecciones de respaldo correspondientes se convierten en protección primaria frente a las fallas que puedan producirse.



Como se mencionó al inicio del trabajo, la coordinación de protecciones formaría parte de este proyecto, sin embargo, por decisiones externas ésta no se realizó, por lo que únicamente se hace una mención general de la misma.



CONCLUSIÓN

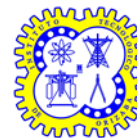
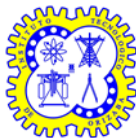
El haber realizado el cálculo de cortocircuito a los diversos equipos instalados en el Ingenio Central Motzorongo S.A. de C.V. trajo consigo buenos resultados.

Basándose en los valores obtenidos, se logró determinar si la capacidad nominal de los dispositivos de protección es la adecuada, de acuerdo a la carga a proteger. En la mayoría de los casos, estos dispositivos si cuentan con la capacidad nominal adecuada, sin embargo, se encuentran muy próximos a rebasarla, por lo que una ampliación del circuito traería consigo problemas de disparos innecesarios, lo cual redundaría en pérdidas en la producción.

Precisamente para evitar estas pérdidas de producción, es necesario realizar un estudio minucioso cada vez que se realice una ampliación, para poder determinar si el interruptor aun cumple con los requerimientos exigidos, o es necesario sustituirlo.

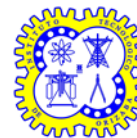
En el caso de Central Motzorongo, como ya se había mencionado anteriormente, la mayoría de los dispositivos se encuentran próximos a superar su capacidad nominal, por lo que en el capítulo IV se incluyen algunas características que deben tomarse en cuenta, en caso de ser necesario el realizar un cambio.

Caso contrario, en algunos otros dispositivos de protección la capacidad nominal del dispositivo de protección es elevada, de acuerdo a la demanda del circuito a proteger, por lo que en estos casos, se decidió ajustar el tiempo de disparo, y así lograr una protección eficiente.



RECOMENDACIONES

- Implementar interruptores con las necesidades requeridas de acuerdo a las características de la carga, ya que en las áreas de cristalización y evaporación, existen tableros que no cuentan con interruptor principal, por lo que un fallo en el interruptor principal del circuito provocaría interrupciones innecesarias.
- Agrupar los equipos de acuerdo al área a la que pertenecen, para facilitar su localización, ya que en algunas áreas existen equipos que no pertenecen a la misma, lo cual genera confusión.
- Realizar revisiones periódicas de la capacidad interruptiva con la que cuentan los interruptores de las diversas áreas, para ir evaluando las condiciones variantes del sistema, de acuerdo a cómo se vayan cumpliendo los planes de expansión, con la entrada en servicio de nuevos proyectos.
- Contar con los recursos informáticos actualizados, realizando ficha técnica de los equipos eléctricos instalados, con la finalidad de tener la información adecuada que posibilite la toma de decisiones bajo condiciones de contingencia operativa.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AUTORES: JOSÉ CARPIO IBAÑEZ, FRANCISCO JURADO MELGUIZO, RAFAEL ASEÑI OROSA, RAFAEL GUIRADO TORRES.

TÍTULO: TECNOLOGÍA ELÉCTRICA.

DATOS DE PUBLICACIÓN: ESPAÑA 2006

EDITORIAL: MC GRAW HILL.

PÁGINAS: 149-183

AUTORES: GILBERTO ENRIQUEZ HARPER.

TÍTULO: PROTECCIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES Y COMERCIALES.

DATOS DE LA PUBLICACIÓN: MÉXICO 2003. PRIMERA REIMPRESION DE LA SEGUNDA EDICION

EDITORIAL: LIMUSA S.A. de C.V.

PÁGINAS: 51-134

AUTORES: GILBERTO ENRIQUEZ HARPER.

TÍTULO: FUNDAMENTOS DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIANA Y ALTA TENSION.

DATOS DE LA PUBLICACIÓN: MÉXICO 2005. SEGUNDA EDICIÓN.

EDITORIAL: LIMUSA S.A. de C.V.

PÁGINAS: 205-248