



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

**CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES
DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN**

Evis Romeo Argueta Rodriguez

Asesorado por el Ing. Jorge Luis Pérez Rivera

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES
DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EVIS ROMEO ARGUETA RODRIGUEZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE LUIS PÉREZ RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto Gonzáles Padilla
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de agosto de 2015.



Evis Romeo Argueta Rodriguez

Guatemala, 29 de enero de 2018

Ingeniero

Saúl Cabezas Duran

Coordinador Área Potencia

Escuela Mecánica Eléctrica

USAC

Por este medio hago de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante universitario EVIS ROMEO ARGUETA RODRIGUEZ con carné 2006-11269 en el desarrollo de su trabajo de graduación titulado **"CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN"**.

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

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Cordialmente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing.  Pérez Rivera

Ingeniero Electricista

Colegiado 3057

Asesor

Jorge Luis Pérez Rivera
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 3057



REF. EIME 11 2018.

26 DE FEBRERO 2018.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE
PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KVA
13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN,** del estudiante **EVIS
ROMEO ARGUETA RODRÍGUEZ,** que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
CARIÑO Y ENSEÑAD A TODOS

M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648
Ing. Saul Cabezas Durán
Coordinador de Potencia



SRO



REF. EIME 10. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **EVIS ROMEO ARGUETA RODRÍGUEZ** titulado: **CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN** procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Fernando Andrino González

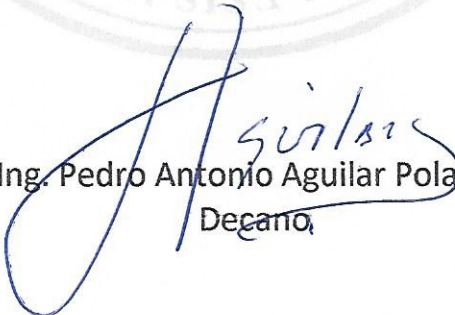


GUATEMALA, 1 DE MARZO 2,018.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **CÁLCULO DE AJUSTES PARA LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE 69 KV A 13.8 KV EN INGENIO LA UNIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Evis Romeo Argueta Rodríguez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el Señor del cielo y de la tierra quién me creo y me sustenta en todo momento y quien merece toda la gloria y honor hoy y siempre.
- Mis padres** Ramiro Argueta y Enma Rodriguez, por ser las personas que me han inculcado en todo momento el temor a Dios y me han brindado siempre su apoyo incondicional.
- Mi esposa** Carmen Dorina Colín, por ser la ayuda idónea en esta nueva etapa de mi vida.
- Mis hijos** Vasti y Bequer por ser mis dos grandes motivaciones.
- Mis hermanos** Ramiro, Adarel, Ana y Ruth, quienes me apoyaron a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por abrirme las puertas para empezar a desarrollarme profesionalmente.

**Facultad de
Ingeniería**

Por forjar mi camino profesional y ayudarme a ser una persona de bien.

Mis maestros

Quienes participaron en la formación de lo que hoy soy y he alcanzado en el ámbito profesional.

Ingenio La Unión

Por impartirme los conocimientos para poder contribuir a partir de la ciencia a encontrar soluciones a las necesidades del quehacer diario en la industria.

Ing. Jorge Pérez

Por sus valiosos aportes en la revisión de este trabajo.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. TRANSITORIOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS	1
1.1. Máquinas eléctricas.....	1
1.1.1. Generador.....	1
1.1.2. Motor	2
1.1.3. Transformador	3
1.2. Fallas en sistemas eléctricos de potencia	4
1.2.1. Perturbaciones.....	4
1.2.1.1. Sobre voltaje.....	5
1.2.1.2. Sobrecargas	6
1.2.1.3. Oscilaciones de potencia	7
1.2.2. Fallas en el sistema	7
1.2.2.1. Circuito abierto.....	7
1.2.2.2. Cortocircuito.....	7
1.2.2.2.1. Cortocircuito trifásico	8
1.2.2.2.2. Cortocircuito trifásico a tierra:	9
1.2.2.2.3. Cortocircuito bifásico	10

	1.2.2.2.4.	Cortocircuito bifásico a tierra.....	11
	1.2.2.2.5.	Corto circuito monofásico a tierra.....	12
	1.2.2.3.	Consecuencias de un cortocircuito.....	13
1.2.3.		Fallas en las máquinas eléctricas.....	14
	1.2.3.1.	Fallas en el generador.....	15
	1.2.3.1.1.	Falla en los devanados.....	15
	1.2.3.1.2.	Pérdida de excitación	16
	1.2.3.1.3.	Motorización del generador.....	16
	1.2.3.1.4.	Sobre carga.....	16
	1.2.3.1.5.	Sobre velocidad	17
	1.2.3.1.6.	Desbalance entre fases	17
	1.2.3.2.	Fallas en el transformador.....	17
	1.2.3.2.1.	Condiciones anormales debido a factores internos.....	18
	1.2.3.2.2.	Pérdida de excitación	18
	1.2.3.2.3.	Motorización del generador.....	19
	1.2.3.2.4.	Sobre carga.....	19
	1.2.3.2.5.	Sobre velocidad	19
	1.2.3.2.6.	Desbalance entre fases	20
	1.2.3.3.	Fallas en el transformador.....	20

	1.2.3.3.1.	Condiciones anormales debido a factores internos	20
	1.2.3.3.2.	Condiciones anormales debido a factores externos	21
1.3.		Transitorios en máquinas eléctricas	22
	1.3.1.	Transitorios en generadores síncronos	23
	1.3.1.1.	Periodo subtransitorio	26
	1.3.1.2.	Periodo transitorio.....	27
	1.3.1.3.	Periodo en estado estacionario o permanente.....	28
	1.3.2.	Transitorios en motores asíncronos.....	30
	1.3.3.	Transitorios en transformadores de potencia.....	32
2.		DATOS PARA EL CÁLCULO DE FALLAS.....	35
	2.1.	Generadores síncronos	35
	2.1.1.	Voltaje nominal	35
	2.1.2.	Potencia nominal	36
	2.1.3.	Factor de potencia	36
	2.1.4.	Número de polos	38
	2.1.5.	Potencia activa	39
	2.1.6.	Potencia reactiva	40
	2.1.7.	Conexión del neutro.....	41
	2.1.8.	Reactancia de puesta a tierra	41
	2.1.9.	Resistencia de puesta a tierra.	42
	2.2.	Transformadores de potencia.....	43
	2.2.1.	Potencia nominal	43
	2.2.2.	Límite de carga normal y emergencia.....	44

2.2.3.	Estimación de la carga mínima, normal y emergencia.....	44
2.2.4.	Voltaje primario y secundario	44
2.2.5.	Número de tomas y porcentaje de paso.....	45
2.2.6.	Impedancia de secuencia directa y cero	45
2.2.7.	Relación X1/R1	46
2.2.8.	Resistencia primaria y secundaria.....	47
2.2.9.	Reactancia primaria y secundaria	47
2.2.10.	Grupo de conexión	47
2.2.10.1.	Conexión en estrella.....	48
2.2.10.2.	Conexión en delta o triángulo.....	48
2.2.10.3.	Conexión en zigzag.....	48
2.2.11.	Tipo de núcleo.....	49
2.2.11.1.	Tipo acorazados.....	50
2.2.11.2.	Tipo columnas	50
2.3.	Conductores.....	51
2.3.1.	Voltaje nominal.....	51
2.3.2.	Longitud.....	51
2.3.3.	Resistencia.....	51
2.3.4.	Reactancia.	52
2.3.5.	Suceptancia.....	52
2.3.6.	Tipo y calibre	52
2.3.7.	Capacidad nominal.....	54
2.3.8.	Límite de carga.....	54
2.4.	Capacitores	54
2.4.1.	Tipo de capacitor.....	54
2.4.2.	Potencia / paso.....	54
2.4.3.	Tipo de conexión	55
2.5.	Interruptores de potencia / fusible	55

2.5.1.	Capacidad interruptiva	55
2.5.2.	Tipo de barra	55
2.6.	Motores asíncronos	55
2.6.1.	Potencia.....	56
2.6.2.	Voltaje.....	56
2.6.3.	Velocidad.....	56
2.6.4.	Número de polos	57
2.6.5.	Conexión	57
2.6.6.	Tipo de rotor	58
2.6.6.1.	Rotor jaula de ardilla.....	58
2.6.6.2.	Rotor devanado	59
2.7.	Valores usados en el cálculo de fallas de equipos en el Ingenio.....	60
3.	MÉTODOS DE CÁLCULOS PARA DETECCIÓN DE FALLAS	67
3.1.	Método de superposición.....	67
3.2.	Método del Equivalente de Thévenin	69
3.3.	Método de los MVA	71
3.4.	Método de las componentes simétricas	71
3.4.1.	Impedancias de secuencia	72
3.4.1.1.	Componentes de secuencia positiva ...	72
3.4.1.2.	Componentes de secuencia negativa..	72
3.4.1.3.	Componentes de secuencia cero	72
3.4.2.	Ecuaciones para el cálculo de fallas simétricas.....	74
3.4.3.	Ecuaciones para el cálculo de fallas asimétricas....	75
3.4.3.1.	Falla fase a tierra	75
3.4.3.2.	Falla fase a fase	76
3.4.3.3.	Falla dos fases a tierra	77

3.4.4.	Procedimiento para el cálculo de fallas por el método de componentes simétricos	77
3.5.	Método de la matriz de impedancias de barra	80
3.6.	Método de cálculo utilizado en el Ingenio.....	81
3.6.1.	Diagrama unifilar utilizado	81
3.6.2.	Pasos realizados en el cálculo	83
4.	CÁLCULO DE AJUSTES DE PROTECCIONES EN EL INGENIO	103
4.1.	Dispositivos de protección eléctrica	103
4.1.1.	Transformadores de medida	103
4.1.2.	Relés	104
4.1.2.1.	Relés convencionales	104
4.1.2.2.	Relés computarizados	104
4.1.3.	Interruptor de potencia	105
4.2.	Datos recopilados para el ajuste de protecciones en Ingenio La Unión	106
4.2.1.	Transformadores de medida	106
4.2.2.	Relés de protección.....	107
4.2.2.1.	Relé multilin 745.....	109
4.2.2.2.	Relé multilin 750.....	109
4.2.2.3.	Relé multilin 489.....	109
4.2.2.4.	Relé SEL-311B.....	110
4.2.3.	Protecciones habilitadas en relés del Ingenio	112
4.3.	Protecciones más relevantes	118
4.3.1.	Protecciones diferencial	118
4.3.2.	Protecciones sobre corriente.....	119
4.3.3.	Protecciones sobre corriente direccional.....	119
4.3.4.	Protección corriente de secuencia negativa	119
4.3.5.	Protección de voltaje	120

4.3.6.	Protección de relación tensión/frecuencia	120
4.3.7.	Protección falla del interruptor	120
4.3.8.	Protección de potencia inversa.....	120
4.3.9.	Protección de frecuencia	121
4.3.10.	Protección de impedancia	121
4.4.	Descripción de los números ANSI/IEEE	121
4.5.	Software utilizado para el cálculo	129
4.5.1.	Descripción del software.....	129
4.5.2.	Criterios utilizados	130
4.5.3.	Resultados del cálculo.....	131
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y AJUSTES PROPUESTOS.....	137
5.1.	Análisis del cálculo de corriente de corto-circuito	137
5.2.	Análisis del cálculo de tiempo de orden de apertura por los relés.....	139
5.2.1.	Al simular un cortocircuito en las barras	139
5.2.2.	Al Simular de un cortocircuito en las cargas.....	148
	CONCLUSIONES	153
	RECOMENDACIONES	155
	BIBLIOGRAFÍA.....	157
	APÉNDICES	159
	ANEXOS.....	227

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Turbo-generador eléctrico de 26 MW	2
2.	Motor eléctrico de 690 KW para 4 160V	3
3.	Transformador de potencia de 25 MVA para 69 000 a 13 800 V	4
4.	Tipos de descargas atmosféricas	6
5.	Cortocircuito trifásico a través de impedancias de falla	9
6.	Cortocircuito trifásico a través de impedancias de falla a tierra	10
7.	Cortocircuito bifásico a través de impedancias de falla	11
8.	Cortocircuito bifásico a través de impedancias de falla a tierra	12
9.	Cortocircuito monofásico a través de impedancias de falla a tierra	13
10.	Corrientes de falla totales en función del tiempo durante una falla trifásica en los terminales de un generador síncrono	25
11.	Componentes de ca de la corriente de falla	28
12.	Corriente de irrupción debida a la corriente de magnetización del transformador de arranque	33
13.	Diagrama vectorial del generador con distintos valores de factor de potencia	37
14.	Rotor de polos lisos	38
15.	Rotor de polos salientes	39
16.	Conexión de resistencia de puesta a tierra por medio de un transformador	42
17.	Conexión de resistencia de puesta a tierra	43
18.	Curva de relación típica X/R en transformadores de potencia. X1/R1	46

19.	Resistencias y reactancias en un transformador	47
20.	Tipos de conexión en los transformadores trifásicos	48
21.	Conexiones más comunes en transformadores trifásicos	49
22.	Construcción de un transformador (a) tipo acorazado y (b) tipo columnas.....	50
23.	Conexión delta y estrella en un motor asíncrono	58
24.	Rotor jaula de ardilla	59
25.	Rotor devanado	60
26.	Fuentes de voltaje y corriente desactivadas	68
27.	Componentes de secuencia.....	73
28.	Trayectoria para la corriente de cada secuencia en un generador y sus respectivas redes de secuencia	78
29.	Esquemas de conexión y símbolos para diagramas unifilares.....	79
30.	Diagramas unifilar 69 000 a 13 800 V	82
31.	Diagramas unifilar 69 000 a 13 800 V en zonas	84
32.	Diagramas de secuencia positiva del sistema	89
33.	Diagramas de secuencia negativa del sistema	90
34.	Diagramas de secuencia cero del sistema.....	91
35.	Diagramas de secuencia positiva del sistema después de la reducción	93
36.	Diagramas de secuencia negativa del sistema después de la reducción	94
37.	Diagramas de secuencia cero del sistema después de la reducción	95
38.	Relevador multilin 745.....	110
39.	Relevador multilin 750.....	111
40.	Relevador multilin 489.....	111
41.	Relevador SEL 311-B	112
42.	Esquema protección diferencial	118

TABLAS

I.	Datos en placa de generadores síncronos del Ingenio	60
II.	Datos de transformadores del Ingenio parte A.....	61
III.	Datos de transformadores del Ingenio parte B.....	62
IV.	Datos de conductores del Ingenio parte A	63
V.	Datos de conductores del Ingenio parte B	64
VI.	Datos de Interruptores y fusibles de protección del Ingenio.....	66
VII.	Identificación de barras	83
VIII.	Valores base por zona	85
IX.	Valores de reactancia de los transformadores, en pu	86
X.	Valores de reactancia de los generadores, en pu	87
XI.	Valores de reactancia de los conductores, en pu.....	87
XII.	Valores de reactancia después de la reducción.....	92
XIII.	Valores de admitancia, en pu.....	96
XIV.	Matriz de admitancias de secuencia positiva y negativa, en pu parte A.....	97
XV.	Matriz de admitancias de secuencia positiva y negativa, en pu parte B.....	97
XVI.	Matriz de admitancias de secuencia cero, en pu parte A.....	98
XVII.	Matriz de admitancias de secuencia cero, en pu parte B.....	98
XVIII.	Matriz invertida de secuencia positiva y negativa, en pu parte A	99
XIX.	Matriz invertida de secuencia positiva y negativa, en pu parte B	99
XX.	Matriz invertida de secuencia cero, en pu parte A	100
XXI.	Matriz invertida de secuencia cero, en pu parte B	100
XXII.	Equivalente de Thévenin en las barras, en pu	101
XXIII.	Valores de corriente y potencia de cortocircuito por barra	101
XXIV.	Relación de transformadores de medición utilizados en el Ingenio.....	106
XXV.	Relés de protección utilizados en el Ingenio	107

XXVI.	Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte A	112
XXVII.	Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte B	113
XXVIII.	Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte C	113
XXIX.	Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte A	114
XXX.	Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte B	114
XXXI.	Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte C	115
XXXII.	Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte D	115
XXXIII.	Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte A	116
XXXIV.	Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte B	116
XXXV.	Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte C	117
XXXVI.	Estatus de protecciones del relé 311B utilizado en el Ingenio	117
XXXVII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Torre de enfriamiento	131
XXXVIII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Calderas 4 y 5	131
XXXIX.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Cachaza	132
XL.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Refinería	132

XL I.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Casa de máquinas	132
XLII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra 2 Tándem B	133
XLIII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Tándem B	133
XLIV.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Turbo 2	133
XLV.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Subestación	134
XLVI.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en las cargas Torre de Enfriamiento 1 y 2.....	134
XLVII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la cargas Refinería, Silo y Envasado.....	135
XLVIII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la cargas Tachos, Batch y Cachaza.....	135
XLIX.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada Calderas 4 y 5.....	135
L.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Ingenio.....	136
LI.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Casa de Máquinas.....	136
LII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada	136
LIII.	Corrientes de cortocircuito y capacidad interruptiva de los interruptores utilizados en el Ingenio.....	138
LIV.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Torre de Enfriamiento	140

LV.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Calderas 4 y 5	141
LVI.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Cachaza	142
LVII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Refinería.....	143
LVIII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Casa de Máquinas.....	144
LIX.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra 2 Tándem B.....	145
LX.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Tándem B.....	146
LXI.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Turbo 2	147
LXII.	Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Subestación.....	147
LXIII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Torre Enfriamiento 1 y 2.....	148
LXIV.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Refinería, Silo y Envasado.....	149
LXV.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Tachos, Batch y Cachaza	149
LXVI.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Caldera 4 y 5.....	150
LXVII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Ingenio	150
LXVIII.	Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada a la carga Casa de Máquinas	151

LXIX. Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Caldera y Enlace 151

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HP	Caballos de fuerza
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
F.E.M.	Fuerza electromotriz
HZ	Hertz
SF6	Hexafluoruro de Azufre
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
KA	Kilo amperio
KVA	Kilo voltio amperio
KV	Kilo voltio
MW	Mega Vatio
MVA	Mega voltio amperio
PU	Por unidad
RMS	<i>Root mean square</i>
V	Voltio

GLOSARIO

Admitancia	Es la inversa de la impedancia.
Amortiguar	Hacer menos intensa, viva o violenta una cosa.
ANSI	Es una organización sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.
Arco Eléctrico	Descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa.
Armónica	Son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.
Barra	Conductor eléctrico metálico grueso que se emplea para captar, transportar o distribuir corrientes eléctricas, de un circuito a otro, de gran intensidad.
Devanado de Excitación	Devanado que genera el campo magnético o inductor.
Diagrama unifilar	Es una representación gráfica de una instalación eléctrica o de parte de ella.

Excitación de un generador	Es el suministro de una corriente continua al rotor con la finalidad de generar un campo magnético.
Flujo residual	Es la capacidad de un material para retener el magnetismo que le ha sido inducido.
Hexafloruro de azufre	Es un gas inerte, más pesado que el aire, no es tóxico ni inflamable, pero es asfixiante y posee un color y olor característicos. Una de las principales características es su elevada constante dieléctrica, por lo que es muy empleado como gas aislante en equipos para distribución de energía eléctrica.
IEC	Es la principal organización del mundo que prepara y publica estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas.
Impedancia	Resistencia aparente de un circuito dotado de capacidad y autoinducción al flujo de una corriente eléctrica alterna, equivalente a la resistencia efectiva cuando la corriente es continua.
Reactancia de dispersión	Flujo que no concatena ningún bobinado aparte de aquel que produce el propio flujo.
Reactancia síncrona	Reactancia que representa el conjunto efectos magnéticos en el estator de un generador en condiciones síncronas de funcionamiento.

Reactancia subtransitoria	Reactancia que representa el conjunto efectos magnéticos en el estator de un generador en los primeros instantes tras un cortocircuito.
Reactancia transitoria	Reactancia que representa el conjunto efectos magnéticos en el estator de un generador en el periodo transitorio tras un cortocircuito.
Reactor	Es un dispositivo compacto para compensar la generación capacitiva en líneas de alta tensión de transmisión larga o en sistemas de cables de gran longitud.
Resistividad	Es la resistencia eléctrica específica de un determinado material.
<i>Root mean square</i>	Valor eficaz que se utiliza especialmente para estudiar las formas de onda periódicas, a pesar de ser aplicable a todas las formas de onda, constantes o no.
Ruptura de aislamiento	Es el voltaje mínimo que debido a que una parte del aislante se convierta conductora.
Saturación magnética	Es un efecto que se observa en algunos materiales magnéticos, y se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización externo no provoca un aumento en la magnetización del material.

Sincronismo	Es cuando dos sistemas eléctricos tienen secuencia de fases idénticas, igual valor de tensión eficaz, e idénticas frecuencias.
Turbina	Máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.
Velocidad angular	Es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se designa mediante la letra griega ω . Su unidad en el Sistema Internacional es el radián por segundo (rad/s).

RESUMEN

Las protecciones eléctricas tienen un papel indispensable en todo sistema eléctrico de potencia, para que opere dentro de los parámetros adecuados. Al producirse una falla las protecciones deben aislar la zona dañada para minimizar los posibles daños y a la vez, garantizar el suministro para la zona no fallada.

El presente trabajo de graduación presenta un análisis de la coordinación de las protecciones actuales instaladas en Ingenio La Unión, para ello se parte de conceptos elementales como son las máquinas eléctricas, los diferentes tipos de fallas que pueden presentarse, y los dispositivos de protección para sistemas eléctricos de potencia.

Se realiza un estudio de cortocircuito y a través de un programa de software, se simulan fallas de cortocircuito en puntos clave del sistema de mediana tensión, y al final se dan algunas recomendaciones con los cambios pertinentes, para una correcta coordinación de las protecciones asociadas al sistema en mención.

OBJETIVOS

General

Proporcionar las recomendaciones pertinentes para una adecuada coordinación de protecciones en el sistema eléctrico de mediana tensión en Ingenio La Unión, para que éste sea confiable, rápido, simple y selectivo.

Específicos

1. Conocer los equipos y protecciones instalados en el sistema de mediana tensión del Ingenio.
2. Evidenciar a través de un cálculo de cortocircuito las magnitudes de corriente y potencia, que pueden generarse al presentarse una falla.
3. Simular fallas de cortocircuito en el sistema para conocer los tiempos en que actuarían las protecciones.
4. Recomendar los ajustes necesarios para que las protecciones actúen en un tiempo adecuado aislando la menor zona posible.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la electricidad es una herramienta indispensable para el quehacer diario del ser humano, a tal punto que muchas fábricas, negocios y residencias cuentan con su propio sistema de suministro de energía para no quedarse sin esta vital herramienta. Muchas empresas se dedican a la generación de energía eléctrica. Todo esto conlleva a estar cerca en todo momento de los equipos eléctricos, cables y otros, lo cual genera peligro para las personas y los diferentes procesos. Por lo anterior es imprescindible contar con una protección adecuada en todo el sistema eléctrico.

En el capítulo I del presente informe se presenta los distintos transitorios y fallas a que están expuestos los equipos eléctricos, y su comportamiento en esos momentos. En el capítulo II se enumeran los datos más importantes de los equipos a tomar en cuenta para la realización de un cálculo de fallas. En el capítulo III se muestran los distintos métodos de cálculos de fallas y se explica porque, se selecciona uno de ellos para el cálculo en el sistema de mediana tensión de ingenio La Unión. El capítulo IV describe los dispositivos de protección eléctrica más relevantes, los utilizados en el presente cálculo y la simulación por software de las protecciones actuales instaladas en el sistema en estudio. Por último en el capítulo V se presenta la simulación del sistema de protección con cambios sugeridos para una adecuada coordinación.

1. TRANSITORIOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

1.1. Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas son el resultado de aplicar los principios del electromagnetismo y en particular la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos magnéticos y circuitos eléctricos entrelazados. Las máquinas eléctricas convierten un tipo de energía a otro tipo de energía, en la cual una de ellas es siempre energía eléctrica como su nombre lo indica.¹

Según el tipo de conversión las máquinas eléctricas se pueden clasificar en tres tipos que son: Generador, motor y transformador.

1.1.1. Generador

El generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Esta conversión se desarrolla por el movimiento de una espira en un campo magnético, produce una f.e.m. inducida que al ser aplicada a un circuito externo produce una corriente que interactúa con el campo magnético y desarrolla una fuerza mecánica, que se opone al movimiento de la espira. Se necesita una fuerza mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente.²

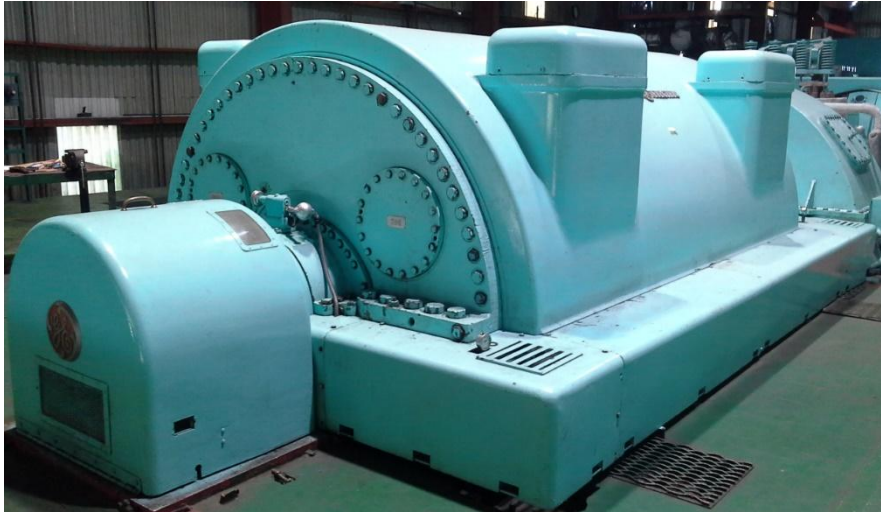
Los generadores son máquinas dotadas de movimiento que por lo general son de rotación.

En la figura 1 se muestra un turbo-generador eléctrico de 26 MW.

¹ FRAILE. Jesús, *Máquinas Eléctricas*. p. 87.

² *Ibíd.* P. 87

Figura 1. **Turbo-generador eléctrico de 26 MW**



Fuente: Ingenio La Unión.

1.1.2. **Motor**

El motor transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Esta conversión se obtiene al introducir una corriente en la máquina a través de una fuente externa, que interactúa con el campo eléctrico produciendo un movimiento de la máquina. Produce así una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y que por esa razón se denomina fuerza contra electromotriz. Como resultado, el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.³

Los motores, al igual que los generadores, son máquinas de movimiento y por lo general también de rotación.

En la figura 2 se muestra un motor para mediana tensión.

³ FRAILE. Jesús, *Máquinas Eléctricas*. p 87.

Figura 2. **Motor eléctrico de 690 KW para 4 160V**



Fuente: Ingenio La Unión.

1.1.3. Transformador

“El transformador convierte una energía eléctrica de entrada de corriente alterna con determinadas magnitudes de tensión y corriente, en otra energía eléctrica de salida de corriente alterna con magnitudes distintas. Los transformadores son máquinas estáticas”.⁴

En la figura 3 se muestra un transformador de potencia de 25 MVA.

⁴ FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 87.

Figura 3. **Transformador de potencia de 25 MVA para 69 000 a 13 800 V**



Fuente: Ingenio La Unión.

1.2. Fallas en sistemas eléctricos de potencia

Por muy bien diseñado que esté un sistema eléctrico de potencia, ocasionalmente experimenta algún tipo de anomalía. Esta anomalía, según la severidad con que afecta el sistema eléctrico de potencia, se puede clasificar en dos tipos: Perturbaciones y fallas.

1.2.1. Perturbaciones

“Las perturbaciones son condiciones que permiten continuar la operación de un sistema, pero puede ocasionar daños a ciertos equipos si es de una

duración prolongada. Estas perturbaciones pueden ser causadas por: sobre voltaje, sobrecarga u oscilaciones de potencia”.⁵

1.2.1.1. Sobre voltaje

Un sobre voltaje es cualquier valor de tensión entre fase y tierra cuyo valor pico es mayor que la tensión máxima del sistema.

Puede ocurrir sobre voltaje temporal, el cual consiste en cambios en la amplitud de la componente de 60 Hz de la tensión o sus armónicas por efecto de operación de maniobra, cambios en el flujo de potencia reactiva, fallas o bien ferresonancia. Un sobre voltaje arriba del 20% del nominal, y de acuerdo a la curva de magnetización del transformador, puede ocasionar saturación en el núcleo del transformador o vibraciones en el núcleo. Las causas principales del sobre voltaje temporal son: efecto Ferranti, cambios bruscos de carga, ferresonancia o conductores abiertos.

Pueden ocurrir también “sobre voltajes de maniobra, que son voltajes transitorios que se producen por cambios bruscos en el sistema, son de corta duración (milisegundos o incluso microsegundos), y que son altamente amortiguados. Las causas principales de los sobre voltajes de maniobra son: Apertura de corrientes de fallas, falla a distancias considerables (a kilómetros del interruptor), apertura en vacío de transformadores y reactores, aperturas de circuitos capacitivos.

También existen sobre voltajes por descargas atmosféricas, las cuales son elevaciones de voltajes por descargas eléctricas atmosféricas entre nube y tierra, que impactan en las líneas de transmisión, y las instalaciones. Estos sobre voltajes son unidireccionales y de muy corta duración, su valor no depende del voltaje del sistema.

Las descargas atmosféricas pueden ser:

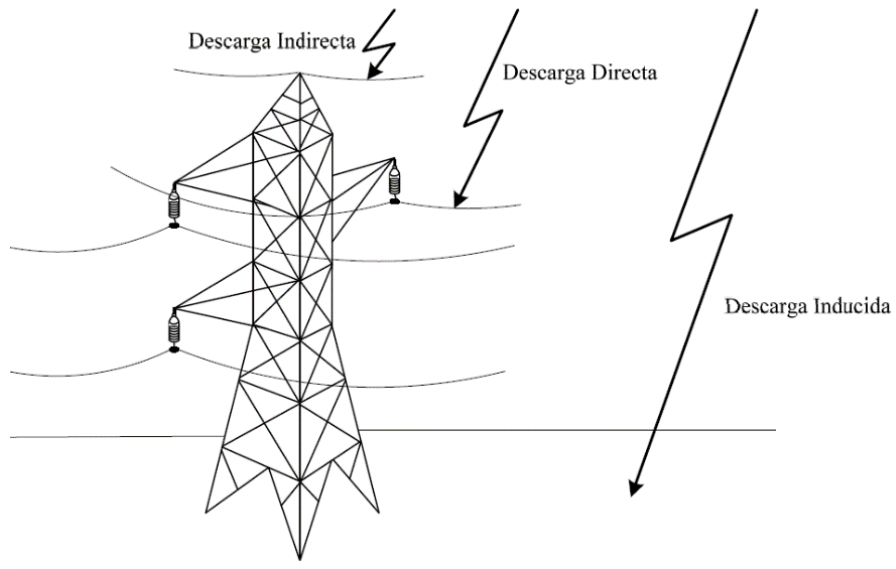
- a) Directas: cuando alcanza alguna de las fases, es muy elevada.
- b) Indirectas: cuando la descarga es en el hilo de guarda, estructuras o blindajes.
- c) Inducidas: cuando la descarga es en las cercanías de las líneas o instalaciones.⁶

En la figura 4 se muestran estos tres tipos de descargas atmosféricas.

⁵ GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 44.

⁶ *Ibíd.* P. 45-50.

Figura 4. Tipos de descargas atmosféricas



Fuente: Gonzáles- Longatt Francisco, *Anormalidades en sistemas de potencia*, fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_I/Capitulo4,SP1-2007.pdf. Consulta: octubre de 2015.

1.2.1.2. Sobrecargas

“Cuando la corriente es mayor a la corriente nominal se dice que un equipo está sobrecargado. Según la duración de la sobrecarga está puede ser de dos tipos: sobre cargas breves y sobre cargas duraderas.

Las causas más comunes de las sobrecargas son: corto circuitos no aislados oportunamente, excesos de carga, efecto Joule”.⁷

⁷ GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 52.

1.2.1.3. Oscilaciones de potencia

Las oscilaciones de potencia comúnmente son causadas por la conexión o desconexión de circuitos del sistema eléctrico cuando se producen variaciones de potencia. La razón de esta oscilación es que los generadores no pueden tomar instantáneamente el ángulo de la impedancia de la carga, sino hasta después de varias oscilaciones amortiguadas. Esto puede causar incluso la pérdida de sincronismo, la cual produce una sobre carga porque las frecuencias generadas son de diferente frecuencia a la industrial. Las oscilaciones de potencia afectan principalmente a los generadores y turbinas, por lo que se utilizan gobernadores o controladores de velocidad para controlarlas.⁸

1.2.2. Fallas en el sistema

Una falla es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente, colocando al sistema en un punto de operación fuera de lo normal.

Una falla eléctrica implica dos posibles estados: circuito abierto o corto circuito.

1.2.2.1. Circuito abierto

Consiste en la falta de continuidad eléctrica de una o más de las fases de un circuito. Las principales causas de un circuito abierto son: operación incorrecta de un interruptor al cambiar de estado y la ruptura en los puentes de conexión en una línea de transmisión.

Un circuito abierto puede ocasionar sobretensiones o desbalance de corrientes, las cuales pueden producir un daño severo en los equipos.⁹

1.2.2.2. Cortocircuito

“Es el fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí,

⁸ GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 53-54.

⁹ *Ibíd.* P. 65.

caracterizándose por la circulación de elevadas corrientes, mayores a la nominal”.¹⁰

Pueden ocurrir distintos tipos de fallas por corto circuito, entre los cuales están el corto circuito trifásico, corto circuito trifásico a tierra, corto circuito bifásico, corto circuito bifásico a tierra, corto circuito a tierra.

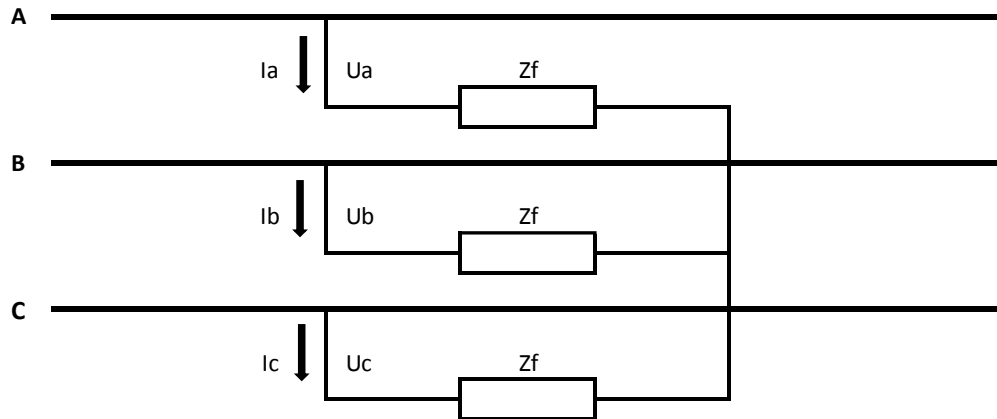
1.2.2.2.1. Cortocircuito trifásico

El cortocircuito trifásico o simétrico ocurre cuando las tres fases entran en contacto entre sí. En este caso el sistema eléctrico sigue balanceado pero con elevadas corrientes.

En la figura 5 se muestra un cortocircuito trifásico a través de impedancias.

¹⁰ GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 58.

Figura 5. **Cortocircuito trifásico a través de impedancias de falla**



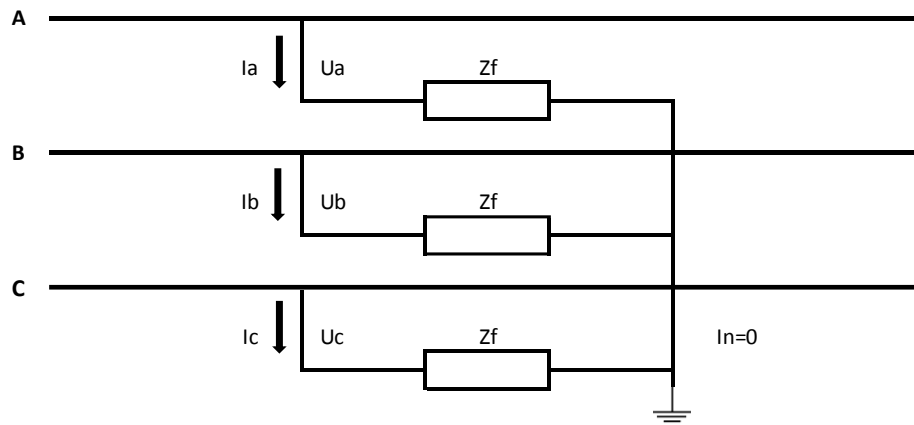
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos104/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

1.2.2.2.2. **Cortocircuito trifásico a tierra:**

El cortocircuito trifásico a tierra ocurre cuando las tres fases entran en contacto entre sí y además en contacto con la tierra, el sistema continúa balanceado pero con elevadas corrientes. Este corto circuito es el menos probable, pero puede ocurrir.

En la figura 6 se muestra un cortocircuito trifásico a tierra a través de una impedancia.

Figura 6. **Cortocircuito trifásico a través de impedancias de falla a tierra**



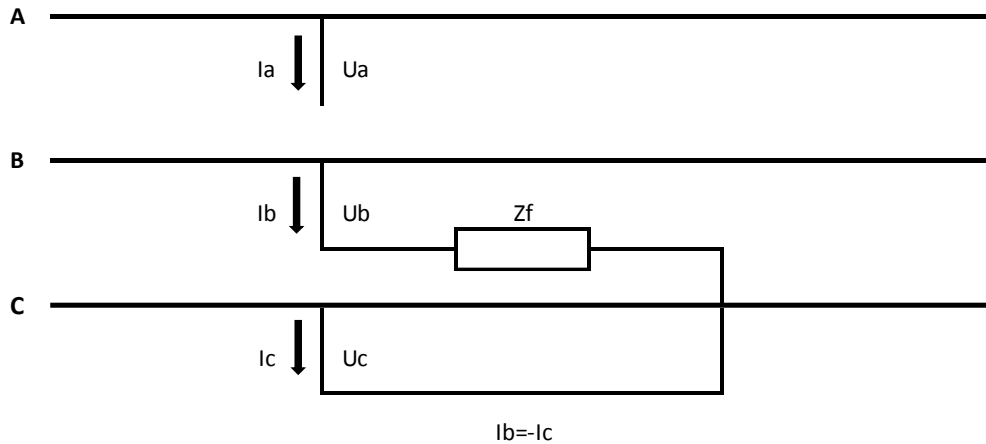
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos104/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

1.2.2.2.3. Cortocircuito bifásico

El cortocircuito bifásico ocurre cuando dos de las fases entran en contacto entre sí, produciendo un desbalance de corriente, y elevada corriente en las dos fases falladas.

En la figura 7 se muestra un cortocircuito de dos fases a través de una impedancia de falla.

Figura 7. **Cortocircuito bifásico a través de impedancias de falla**



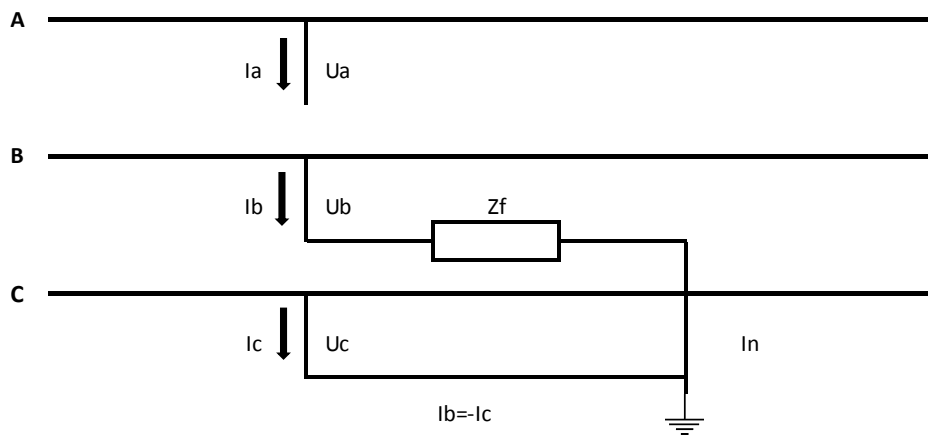
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos104/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

1.2.2.2.4. **Cortocircuito bifásico a tierra**

El cortocircuito bifásico a tierra ocurre cuando dos de las fases entran en contacto entre sí y tierra, produciendo un desbalance de corriente y elevada corriente en las dos fases falladas.

En la figura 8 se muestra un corto circuito entre dos fases a través de una impedancia de falla a tierra.

Figura 8. **Cortocircuito bifásico a través de impedancias de falla a tierra**



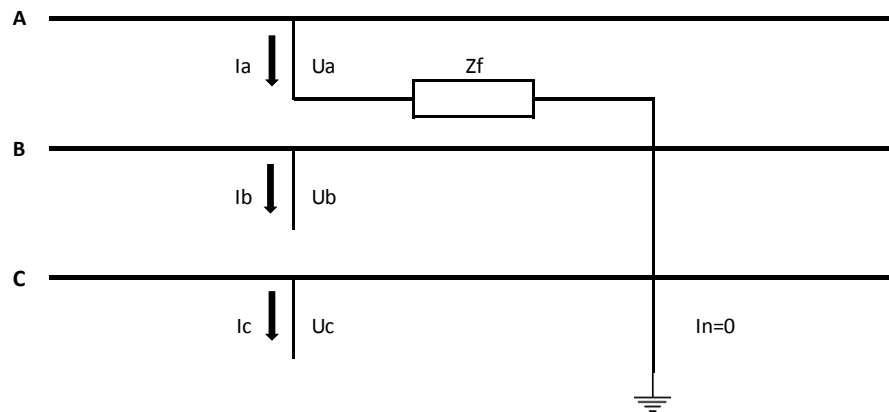
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos104/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

1.2.2.2.5. **Corto circuito monofásico a tierra**

El corto circuito monofásico a tierra ocurre cuando una de las fases hace contacto con la tierra, produciendo un desbalance de corriente y elevada corriente en la fase fallada. Esta es el corto circuito más común.

En la figura 9 se muestra un cortocircuito de una fase a tierra a través de una impedancia de falla.

Figura 9. **Cortocircuito monofásico a través de impedancias de falla a tierra**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos104/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia/calculo-cortocircuitos-sistemas-electricos-potencia.shtml>. Consulta: octubre de 2015.

1.2.2.3. Consecuencias de un cortocircuito

- Destrucción física del lugar donde ocurre la falla: esto se debe a la gran cantidad de energía disipada por el arco eléctrico en el momento de la falla.
- Esfuerzos mecánicos: debido a la interacción de las grandes corrientes con los campos magnéticos se producen esfuerzos mecánicos severos, que pueden deformar piezas de los equipos o hasta destrucción de los mismos.
- Dilatación o contracción térmica: las altas corrientes de corto circuito provocan una disipación térmica debido al efecto Joule, e inclusive fusión de algunos elementos.
- Interrupción del suministro de energía: al ocurrir un corto circuito las protecciones del circuito deben actuar, lo cual implicará dejar sin energía eléctrica ese circuito y si el sistema de protecciones no está bien coordinado puede incluir otros circuitos adyacentes al fallado.¹¹

¹¹ GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 63.

- Sobre tensiones: al ocurrir un corto circuito asimétrico, la fase o fases no afectadas tenderán a elevar la tensión sobre el valor nominal.
- Caídas de tensión: la fase fallada tendrá una disminución de tensión considerable.
- Oscilación electromagnética en la máquina síncrona: las corrientes de corto circuito alteran el equilibrio entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica de la máquina.
- Generación de par rotórico negativo: el devanado de amortiguamiento es sobre cargado por la asimetría de las tensiones y las corrientes del corto circuito.
- “Inducción de perturbación en sistemas vecinos: debido al campo magnético asociado a la falla”,¹² especialmente en circuitos de telecomunicaciones y otras redes eléctricas.
- Incremento de la tensión de paso y torque: si el corto circuito es a tierra circulará una corriente por la tierra en ese instante.

1.2.3. Fallas en las máquinas eléctricas

Así como los sistemas eléctricos de potencia están sujetos a fallas, también las máquinas eléctricas sufren anomalías en el funcionamiento.

A continuación se presentarán las fallas más comunes en las máquinas eléctricas.

¹² GONZÁLES, Francisco. *Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia*. p. 64.

1.2.3.1. Fallas en el generador

Fallas en el generador: se enumeran las fallas más comunes y relevantes en los generadores de potencia eléctrica, explicando las causas por las que pueden ocurrir y los efectos en el generador o en el sistema eléctrico.

1.2.3.1.1. Falla en los devanados

Los tipos de fallas que pueden ocurrir en los sistemas de aislamiento de los devanados de un generador son:

- Corto circuito entre fases
- Corto circuito entre espiras
- Falla a tierra del estator
- Falla a tierra del rotor
- Corto circuito entre espiras en el rotor

Las primeras dos fallas resultan en una severa corriente dentro de la máquina, que suelen ser muy destructivas pues se presentan daños graves. Una consecuencia de esto es una diferencia entre las corrientes al neutro y los terminales de un devanado particular.¹³

Las fallas son el resultado de la ruptura del aislamiento o de arcos que ocurren alrededor del aislamiento en algún punto. Y “El resultado de una falla es una trayectoria conductiva entre puntos que normalmente están a una diferencia de potencial. Si la trayectoria tiene una alta resistencia, la falla es acompañada por un notable cambio de voltaje en el área afectada. Si la trayectoria es de baja resistencia, resulta una corriente grande, la cual puede causar serios daños”.¹⁴

¹³ CASTAÑO, Samuel. *Protecciones Eléctricas*. p. 207, 209.

¹⁴ *Ibíd.*

1.2.3.1.2. Pérdida de excitación

La desconexión de la excitación de un generador síncronico que opera en paralelo con el sistema de potencia, hace que la unidad tome la excitación de la red en forma de potencia reactiva, quedando como generador de inducción que gira por encima de la velocidad síncrona.

Si esta condición se prolonga se producirán sobre temperaturas en el generador o en las unidades que funcionan en paralelo con él. Lo más probable es que la máquina salga de sincronismo ocasionando transitorios que pueden arrastrar otras máquinas y desarrollar inestabilidad general, y paro del sistema a menos que otros generadores absorban la carga adicional.

1.2.3.1.3. Motorización del generador

Cuando el fluido que acciona la turbina se suprime sin desconectar el generador del sistema, el generador quedará actuando como motor síncrono dando suficiente potencia para mover la turbina impulsora, produciendo calentamiento inadmisibles de la máquina motriz. Si se trata de turbogeneradores aún existe otro peligro pues la turbina puede embalsarse si se abre el interruptor del generador sin que la admisión de vapor en la turbina esté completamente cerrada.

Por lo tanto, el funcionamiento del generador como motor es el resultado de una deficiencia en la alimentación de la máquina motriz, por lo que el generador toma energía del sistema y funciona como un motor síncrono prácticamente en vacío, moviendo a la turbina a velocidad normal.¹⁵

1.2.3.1.4. Sobre carga

Una sobre carga produce sobre corrientes en los devanados del generador que a la vez se transforma en sobrecalentamiento en las bobinas del estator.

¹⁵ CASTAÑO, Samuel. *Protecciones Eléctricas*. p. 255.

1.2.3.1.5. Sobre velocidad

El generador no debe trabajar a una velocidad por encima del 3% o 5% de la nominal. El funcionamiento a una sobre velocidad producirá sobre frecuencia en las cargas conectadas al sistema alimentado por el generador.

1.2.3.1.6. Desbalance entre fases

Las corrientes trifásicas desequilibradas del estator originan corrientes de doble frecuencia que se inducen en el hierro del rotor. Estas corrientes producen sobrecalentamiento rápido del rotor y vibración severa. La duración de estas corrientes desequilibradas del estator sin peligro de daño puede expresarse como lo indica la ecuación 1.1

$$K = \int_0^T i^2 dt \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde i^2 es la componente de secuencia negativa de la corriente del estator como una función del tiempo, K es una constante igual a 40 para generadores con turbinas hidráulicas y generadores manejados por máquinas, y K es igual a 30 para generadores con turbina de vapor, condensadores síncronos y grupos convertidores de frecuencia. Si el valor integrado es mayor que dos veces el valor dado para K, puede esperarse un daño serio.

1.2.3.2. Fallas en el transformador

En contraste con los generadores, en los cuales pueden surgir muchas condiciones normales, los transformadores de potencia pueden sufrir solo cortocircuitos de devanados, circuitos abiertos, o sobre calentamiento.

1.2.3.2.1. Condiciones anormales debido a factores internos

- Fallas a tierra

Una falla en un devanado del transformador resultará en corrientes que dependen de la fuente, de la impedancia de puesta a tierra del neutro, de la reactancia de dispersión del transformador y de la posición de la falla en los devanados. Las conexiones de los devanados también influyen en la magnitud de la corriente de falla.

- Fallas en el núcleo

Debido al rompimiento del aislamiento, lo cual permite el flujo de suficiente corriente de Eddy que causa sobre calentamiento y puede alcanzar gran magnitud como para dañar el devanado.

- Fallas entre espiras

Ocurren debido a arcos en los devanados causados por descargas en la línea.

Un cortocircuito de unas pocas espiras del devanado generará corrientes altas en los lazos cortocircuitados, pero las corrientes en los terminales serán bajas.

- Fallas fase-fase

Es raro que ocurran pero si se presentan, resultarán en elevadas corrientes de magnitudes similares a las corrientes de falla a tierra.

- Fallas del tanque

Ocasionalmente pérdidas de aceite y se reduce el aislamiento de los devanados así como elevaciones anormales de temperatura.¹⁶

1.2.3.2.2. Pérdida de excitación

La desconexión de la excitación de un generador sincrónico que opera en paralelo con el sistema de potencia, hace que la unidad tome la excitación de la red en forma de potencia reactiva, quedando como generador de inducción que gira por encima de la velocidad síncrona.

¹⁶ CASTAÑO, Samuel. *Protecciones Eléctricas*. p. 266-267.

Si esta condición se prolonga se producirán sobre temperaturas en el generador o en las unidades que funcionan en paralelo con él. Lo más probable es que la máquina salga de sincronismo ocasionando transitorios que pueden arrastrar otras máquinas y desarrollar inestabilidad general, y paro del sistema a menos que otros generadores absorban la carga adicional.

1.2.3.2.3. Motorización del generador

Cuando el fluido que acciona la turbina se suprime sin desconectar el generador del sistema, el generador quedará actuando como motor síncrono dando suficiente potencia para mover la turbina impulsora, produciendo calentamiento inadmisibles de la máquina motriz. Si se trata de turbogeneradores aún existe otro peligro pues la turbina puede embalsarse si se abre el interruptor del generador sin que la admisión de vapor en la turbina esté completamente cerrada.

Por lo tanto, el funcionamiento del generador como motor es el resultado de una deficiencia en la alimentación de la máquina motriz, por lo que el generador toma energía del sistema y funciona como un motor síncrono prácticamente en vacío, moviendo a la turbina a velocidad normal.¹⁷

1.2.3.2.4. Sobre carga

Una sobre carga produce sobre corrientes en los devanados del generador que a la vez se transforma en sobrecalentamiento en las bobinas del estator.

1.2.3.2.5. Sobre velocidad

El generador no debe trabajar a una velocidad por encima del 3% o 5% de la nominal. El funcionamiento a una sobre velocidad producirá sobre frecuencia en las cargas conectadas al sistema alimentado por el generador.

¹⁷ CASTAÑO, Samuel. *Protecciones Eléctricas*. p. 268.

1.2.3.2.6. Desbalance entre fases

Las corrientes trifásicas desequilibradas del estator originan corrientes de doble frecuencia que se inducen en el hierro del rotor. Estas corrientes producen sobrecalentamiento rápido del rotor y vibración severa. La duración de estas corrientes desequilibradas del estator sin peligro de daño puede expresarse como lo indica la ecuación 1.1

$$K = \int_0^T i^2 dt \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde i^2 es la componente de secuencia negativa de la corriente del estator como una función del tiempo, K es una constante igual a 40 para generadores con turbinas hidráulicas y generadores manejados por máquinas, y K es igual a 30 para generadores con turbina de vapor, condensadores síncronos y grupos convertidores de frecuencia. Si el valor integrado es mayor que dos veces el valor dado para K, puede esperarse un daño serio.

1.2.3.3. Fallas en el transformador

En contraste con los generadores, en los cuales pueden surgir muchas condiciones normales, los transformadores de potencia pueden sufrir solo cortocircuitos de devanados, circuitos abiertos, o sobre calentamiento.

1.2.3.3.1. Condiciones anormales debido a factores internos

Hay que tomar en cuenta que existen condiciones que pueden ocasionar fallas en el transformador que se detallan a continuación.

- **Fallas a tierra**

Una falla en un devanado del transformador resultará en corrientes que dependen de la fuente, de la impedancia de puesta a tierra del neutro, de la reactancia de dispersión del transformador y de la posición de la falla en los devanados. Las conexiones de los devanados también influyen en la magnitud de la corriente de falla.

- **Fallas en el núcleo**

Debido al rompimiento del aislamiento, lo cual permite el flujo de suficiente corriente de Eddy que causa sobre calentamiento y puede alcanzar gran magnitud como para dañar el devanado.

- **Fallas entre espiras**

Ocurren debido a arcos en los devanados causados por descargas en la línea.

Un cortocircuito de unas pocas espiras del devanado generará corrientes altas en los lazos cortocircuitados, pero las corrientes en los terminales serán bajas.

- **Fallas fase-fase**

Es raro que ocurran pero si se presentan, resultarán en elevadas corrientes de magnitudes similares a las corrientes de falla a tierra.

- **Fallas del tanque**

Ocasionan pérdidas de aceite y se reduce el aislamiento de los devanados así como elevaciones anormales de temperatura.¹⁸

1.2.3.3.2. Condiciones anormales debido a factores externos

Estas condiciones resultan en esfuerzos severos sobre el transformador.

- **Sobre carga**

Incrementa las pérdidas de I^2R y la elevación asociada de temperatura.

¹⁸ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 321.

- **Fallas del sistema**

Producen efectos similares a la sobre carga y algunas veces más severos.

- **Sobre voltaje**

Debido a descargas transitorias o a incrementos de voltaje a frecuencia 60 Hz produciendo esfuerzos al aislamiento e incremento en el flujo.

- **Operación a baja frecuencia del sistema**

Resultará en incremento de flujo, causando un aumento en las pérdidas en el núcleo y la correspondiente elevación de la temperatura. Cuando un transformador es conmutado en cualquier punto de la onda de voltaje, los valores pico de la onda de flujo del núcleo dependerán del flujo residual así como del tiempo de conmutación. El valor pico del flujo será más alto que el valor de estado estable correspondiente y estará limitado por la saturación del núcleo.¹⁹

1.3. Transitorios en máquinas eléctricas

Se le denomina transitorio de la máquina al cambio de un estado energético a otro.

Durante los cambios en la condición de operación de una máquina síncrona existe energía atrapada tanto en los campos magnéticos como en la masa rotante.

El análisis de los procesos transitorios se pueden dividir en dos tipos: transitorios electromagnéticos y transitorios electromecánicos.

Aun cuando el proceso transitorio es continuo, la existencia de constantes de tiempo muy diferenciadas permite hacer estas dos separaciones.

Las constantes de tiempo mecánicas son muy lentas en máquinas de gran dimensión en comparación con las constantes de tiempo electromagnéticas.

¹⁹ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 322.

El análisis transitorio electromagnético estudia el comportamiento de los flujos, enlaces de flujo, fuerzas electromotrices y tensiones de la máquina durante perturbaciones rápidas, considerando que la velocidad mecánica es prácticamente constante en todo el proceso.

En los estudios de transitorios electromecánicos se determina el comportamiento dinámico del sistema mecánico, utilizando valores medios de la potencia. Estos procesos están estrechamente interrelacionados, por lo que la separación es un tanto artificial, pero tiene el propósito de simplificar el análisis.

1.3.1. Transitorios en generadores síncronos

Cuando en una red de energía se produce una falla, la corriente que circula viene determinada por la f.e.m. de las máquinas de la red, por sus impedancias y por las impedancias de la red entre las máquinas y la falla. La corriente que pasa por una máquina síncrona inmediatamente después de la falla, la que circula varios ciclos más tarde y la persistente o valor correspondiente al estado permanente de la falla son completamente distintas a causa del efecto de la corriente en el rotor sobre el flujo que genera la tensión en la máquina.

La corriente varía con lentitud relativa desde su valor inicial hasta el correspondiente al estado permanente.

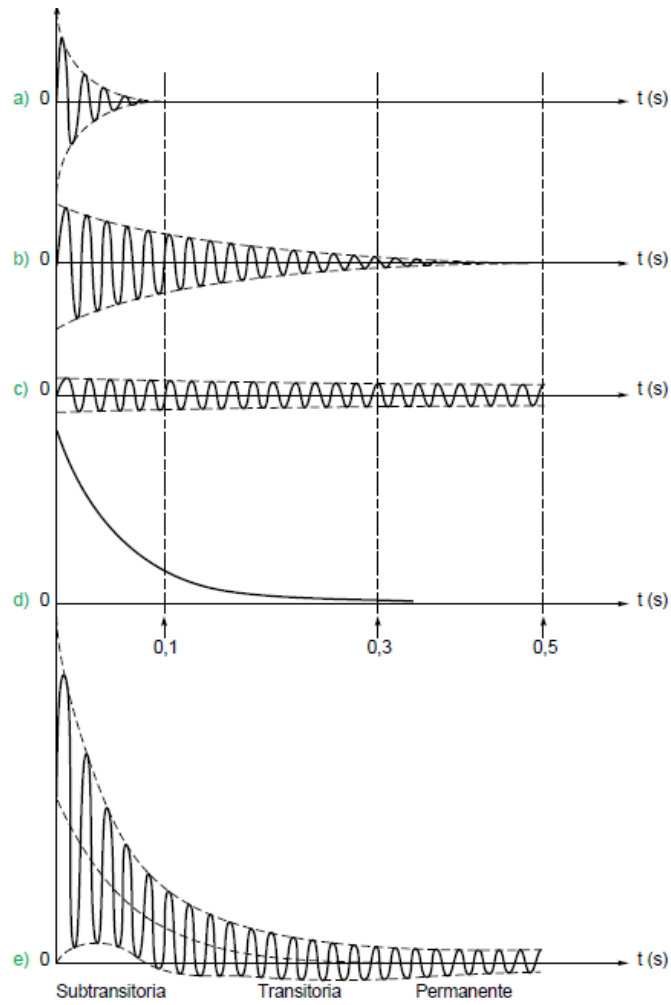
La condición transitoria más severa que se puede presentar en un generador síncrono es la situación en la que los tres terminales del generador entran en corto circuito súbitamente.¹⁸

Los diferentes componentes de la corriente presentes en un generador síncrono en cortocircuito son:

- a) Componente i_{cd}
- b) Componente i_{ca}

La figura 10 muestra el flujo resultante en las fases de un generador al momento de ocurrir un cortocircuito. En el inciso (a), el aporte de la reactancia subtransitoria, en el inciso (b) el aporte de la reactancia transitoria, en el inciso (c) el aporte de la reactancia permanente, en el inciso (d), el aporte de la componente de corriente continua. Al final en el inciso (e), la curva resultante.

Figura 10. **Corrientes de falla totales en función del tiempo durante una falla trifásica en los terminales de un generador síncrono**



Fuente: Cuaderno Técnico nº 158, *Cálculo de corriente de cortocircuito*, Schneider Electric. p. 12.

“Antes de la falla sólo hay voltajes y corrientes ca dentro del generador, mientras que después de la falla se presentan tanto corrientes de ca como corrientes de cd”.²⁰

La aparición de estas componentes de cd se basa en el concepto de flujo atrapado, un concepto relacionado con la ley de Lenz. Esta ley establece que un cambio en el flujo induce una f.e.m. que provoca a su vez corrientes en los circuitos afectados que tienden a oponerse a los cambios del flujo. Por ello, cuando se produce un corto circuito en un alternador, fluirán corrientes en las tres fases del inducido, en el devanado de excitación y en los devanados amortiguadores que intentarán mantener el flujo en el mismo valor que tenía en el instante previo a la falla. Es decir cuando se produce el corto circuito, la componente alterna de corriente salta a un valor muy alto, pero la corriente total no puede cambiar en ese instante, de ahí que aparezca una cd suficientemente grande para que la suma de las componentes de ca y de cd instantáneamente después de la falla sea igual a la corriente alterna que circulaba antes de la falla.

Las componentes de cd se extinguen rápidamente pero inicialmente pueden llegar a alcanzar el 50% o 60% de los valores de la ca un instante después de la falla. De este modo la corriente inicial total puede llegar a valer de 1,5 a 1,6 veces la magnitud de la componente de ca.²¹

La componente de ca simétrico de las corrientes se puede dividir en tres periodos que son: período subtransitorio, período transitorio y período permanente.

1.3.1.1. Período subtransitorio

“La corriente rms de ca denominada corriente subtransitoria, y denotada con el símbolo I'' que fluyen dentro del generador, es causado por los devanados de amortiguamiento en un generador síncrono. Esta corriente subtransitoria es, por lo general, 10 veces el valor de la corriente de falla en estado estacionario”.²²

²⁰ FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 463.

²¹ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p.323.

²² CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p.324.

La corriente subtransitoria se define por la ecuación 1.2

$$I'' = \frac{Ea}{X''} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

I'' : Corriente subtransitoria.

Ea : Voltaje interno generado.

X'' : Reactancia subtransitoria.

1.3.1.2. Periodo transitorio

“La corriente rms de ca denominada corriente transitoria y denotada con el símbolo I' que fluye dentro del generador causado por la corriente inducida en el circuito de campo en el momento del corto incrementando el momento el voltaje interno generado. Esta corriente transitoria, es alrededor de 5 veces la corriente de falla en estado estacionario”.²³

La corriente transitoria se define por la ecuación 1.3

$$I' = \frac{Ea}{X'} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde:

I' : Corriente transitoria.

Ea : Voltaje interno generado.

X' : Reactancia transitoria.

²³ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p.324.

1.3.1.3. Periodo en estado estacionario o permanente

La corriente de estado estacionario I_s , es alcanzada después del período transitorio y está dada por la ecuación 1.4.

$$I_s = \frac{E_a}{X_s} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

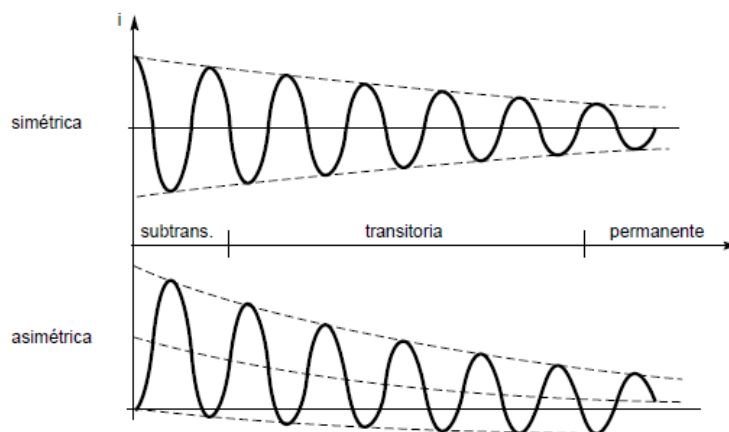
I_s : Corriente en estado estacionario.

E_a : Voltaje interno generado.

X_s : Reactancia síncrona

En la figura 11 se muestra la componente simétrica y la componente asimétrica de la corriente de cortocircuito.

Figura 11. Componentes de ca de la corriente de falla



Fuente: Cuaderno Técnico nº 158, *Cálculo de corriente de cortocircuito*, Schneider Electric. p. 13.

Durante aproximadamente el primer ciclo después de la falla, la componente de la ca es muy grande y decae rápidamente, correspondiente al período subtransitorio. Concluido este período, la corriente sigue disminuyendo más lentamente, correspondiente al período transitorio. Y el momento después de alcanzar un régimen permanente corresponde al período llamado período estacionario.

Asociadas a estas corrientes están las constantes de tiempo. La correspondiente al período subtransitorio se denota con el símbolo T'' . La correspondiente al período transitorio se denota con el símbolo T' .

“La magnitud rms de la corriente de falla de ca en un generador síncrono varía continuamente en función del tiempo”.²⁴ Y se puede calcular con la ecuación 1.5

$$I(t) = (I'' - I')e^{-\frac{t}{T''}} + (I' - I_s)e^{-\frac{t}{T'}} + I_s \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

I : corriente de falla en un generador síncrono.

I'' : corriente subtransitoria

I' : corriente transitoria

I_s : corriente permanente

t : tiempo en que se desea conocer la magnitud de la corriente

T : constantes de tiempo.

Los valores aproximados de las magnitudes descritas en las ecuaciones precedentes son:

²⁴ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p.139.

$T'' = 0,03$ segundos

$T' = 1$ segundo

$X'' = 0,1$ a $0,25$ p.u.

$X' = 0,22$ a $0,35$ p.u.

$X_s = 1$ a 2 p.u.

1.3.2. Transitorios en motores asíncronos

Cuando se accionan motores asíncronos, por lo general se desprecian los procesos electromagnéticos, puesto que estos se desarrollan más rápido que los procesos mecánicos.

La ecuación 1.6, que es la ecuación de momentos, nos indica que el par desarrollado por un motor asíncrono se equilibra con el par resistente y por el momento dinámico.

$$T - T_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde:

T = par electromagnético producido por el motor.

T_r = par resistente de la carga.

J = momento polar de inercia de las masas giratorias.

ω = velocidad angular de rotación.

El momento de inercia del accionamiento se puede expresar con la ecuación 1.7.

$$J = mp^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde:

p = radio de inercia

D = diámetro de inercia

G = el peso de las masas giratorias

g = la aceleración de la gravedad.

m = la masa giratoria.

Sustituyendo variables en estas ecuaciones, se obtiene la ecuación 1.8 que es la ecuación de la dinámica de rotación en una forma más conocida por el ingeniero.

$$T - Tr = \frac{GD^2}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad \text{Ec. 1.8}$$

Donde:

La magnitud GD^2 recibe el nombre de momento giratorio. Esta magnitud se incluye en los catálogos de los fabricantes de motores eléctricos con la denominación PD^2 . El valor de catálogo de GD^2 se deberá dividir por cuatro, para obtener el momento J en unidades SI.

A partir de la ecuación 1.5 se observa que:

- a) Cuando $T > Tr, \frac{d\omega}{dt} > 0$; tiene lugar la aceleración del motor.
- b) Cuando $T < Tr, \frac{d\omega}{dt} < 0$; el motor sufre una desaceleración del motor.

- c) Cuando $T = Tr, \frac{d\omega}{dt} > 0$; el motor trabaja en régimen permanente en un estado de equilibrio.

1.3.3. Transitorios en transformadores de potencia

En el momento en que se energiza por primera vez un transformador a la línea de potencia, puede darse un problema relacionado con el nivel de voltaje debido a la corriente de irrupción.

La máxima altura alcanzada por el flujo en el primer semiciclo del voltaje aplicado depende de la fase del voltaje en el momento de su aplicación.

Por ejemplo, si el voltaje inicial es:

$$V(t) = V_{max} \text{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad \text{Ec. 1.9}$$

Donde:

$V(t)$ = la magnitud del voltaje en el tiempo t .

V_{max} = el voltaje máximo.

ω = la velocidad angular.

t = tiempo en que se evalúa la función.

Que es lo mismo dado por la ecuación:

$$V(t) = V_{max} \text{cos}(\omega t), \quad \text{Ec. 1.10}$$

Y si el flujo inicial es cero en el núcleo, entonces el flujo máximo durante el primer semiciclo será igual al flujo máximo en estado estacionario, es decir:

$$\phi_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_p} \quad \text{Ec. 1.11}$$

Este nivel de flujo es justamente el flujo en estado estacionario, por lo que no causa ningún problema en especial.

Pero si el voltaje aplicado es:

$$V(t) = V_{max} \text{sen}(\omega t) \quad \text{Ec. 1.12}$$

El flujo máximo durante el primer semiciclo es:

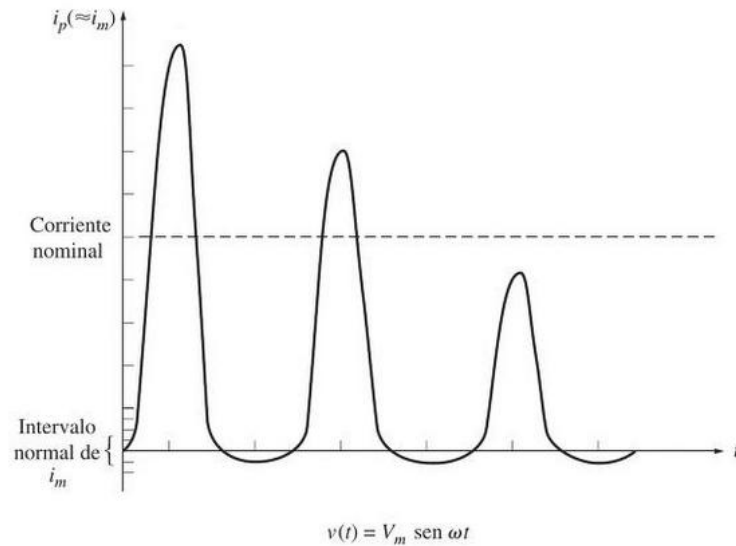
$$\phi_{max} = \frac{2V_{max}}{\omega N_p} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Este flujo máximo es el doble del flujo en estado estacionario.

Al examinar la curva de magnetización se ve que al duplicar el flujo máximo en el núcleo causará una corriente de magnetización muy grande.²⁵

En la figura 12 se ve el comportamiento de la corriente con respecto al tiempo al ser energizado por primera vez un transformador.

Figura 12. **Corriente de irrupción debida a la corriente de magnetización del transformador de arranque**



Fuente: Chapman, J. Stephen. *Máquinas Eléctricas*. p. 140.

Para cualquier otro ángulo de fase aplicado entre 90° , que no causa problema, y 0° , que es el peor caso, hay cierta cantidad de flujo de corriente en exceso.

El ángulo de fase del voltaje aplicado por lo general no se controla en el arranque, por lo que hay una gran corriente de irrupción durante los primeros ciclos después de que se conecta el transformador a la línea. Por lo que el transformador y el sistema de potencia al que se conectan deben ser capaces de soportar estas corrientes.²⁶

²⁵ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p.140.

²⁶ Ibíd.

2. DATOS PARA EL CÁLCULO DE FALLAS

Para poder hacer un análisis de cálculo de fallas, se necesitan principalmente los datos de placa de los equipos para partir de los valores nominales del fabricante, además de estos valores es necesario también conocer otros que por lo general no los encontraremos en la placa del equipo, por lo que habrá necesidad de recurrir a consultar manuales de fabricante, y en algunos casos consultar libros de referencia para conocer valores típicos de los datos a consideración.

A continuación se hace una descripción breve de lo que significa el dato a considerar en cada equipo.

2.1. Generadores síncronos

A continuación se listan los datos necesarios para el cálculo de fallas en los generadores síncronos.

2.1.1. Voltaje nominal

“Es el valor de tensión al que está diseñado el generador para operar, el cual depende del flujo, la velocidad de rotación y la construcción mecánica de la máquina”.²⁷

²⁷ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 273.

2.1.2. Potencia nominal

El valor nominal de potencia aparente en un generador es determinado por la ecuación 2.1

$$S = 3V_{\phi}I_A \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

S: potencia aparente.

V_{ϕ} : voltaje nominal

I_A : corriente en el inducido

Puesto que el voltaje nominal es constante, entonces el límite de potencia al que puede operar el generador lo establece la corriente en el inducido.

2.1.3. Factor de potencia

El factor de potencia se define como la fracción de la potencia aparente S que en realidad suministra potencia real a la carga, lo cual se expresa con la ecuación 2.2

$$FP = \cos\theta = \frac{P}{S} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

FP: factor de potencia

θ : es el ángulo de impedancia de la carga

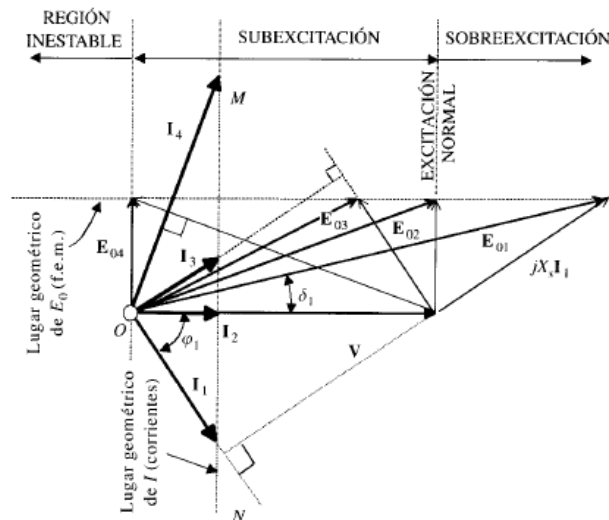
S: potencia aparente de la carga

P: potencia real suministrada a la carga

En un generador eléctrico el factor de potencia nominal que indica el fabricante es el mínimo aceptable cuando el generador opera a potencia nominal. Este valor está determinado por la corriente de campo de la máquina.

En la figura 13 se muestra un diagrama vectorial donde se indican varios valores de factor de potencia en el cual se evidencia que habrá ciertos valores que podrían llevar los vectores a la región inestable por lo que son valores no adecuados, porque dañarían el generador.

Figura 13. **Diagrama vectorial del generador con distintos valores de factor de potencia**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 440.

Según se puede apreciar en la figura 13, es posible que el generador trabaje sobreexcitado o subexcitado dependiendo si el ángulo de la corriente está en adelanto o en atraso.

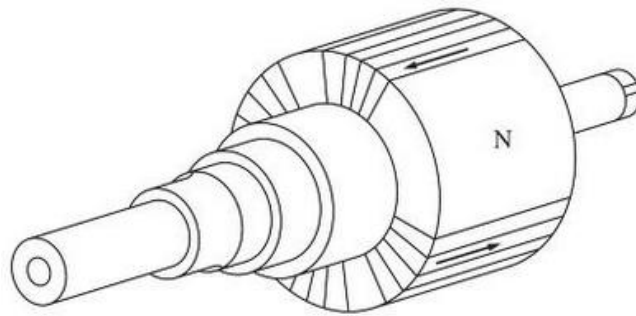
2.1.4. Número de polos

Los polos magnéticos en el rotor pueden ser tanto salientes como lisos. El término salientes significa proyectado hacia afuera o prominente y un polo saliente es un polo magnético proyectado hacia afuera de la superficie del rotor.

Por lo regular, los rotores de polos lisos se utilizan para rotores de dos o cuatro polos, mientras que los rotores de polos salientes normalmente se usan para rotores con cuatro o más polos.²⁸

En la figura 14 se muestra un rotor de polos lisos y en la figura 15 se muestra un rotor de polos salientes.

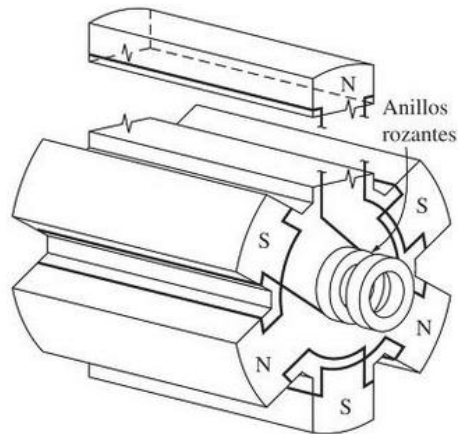
Figura 14. Rotor de polos lisos



Fuente: CHAPMAN, J. *Stephen. Máquinas Eléctricas*. p. 268.

²⁸ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 268.

Figura 15. **Rotor de polos salientes**



Fuente: *Chapman, J. Stephen. Máquinas Eléctricas. p. 269.*

El número de polos está relacionado con la velocidad mecánica y la frecuencia eléctrica por la ecuación 2.3

$$n = \frac{120 f}{p} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

n: velocidad del campo magnético en rpm.

f: frecuencia eléctrica en Hz.

p: número de polos.

2.1.5. **Potencia activa**

El valor de potencia activa suministrado por una máquina síncrona está dado por la ecuación 2.4

$$P = \frac{3EV}{X_s} \text{sen}\emptyset \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

E: fuerza electromotriz generado por la máquina antes de pasar por la reactancia síncrona.

V: voltaje en las terminales del generador.

X_s : reactancia síncrona de la máquina.

\emptyset : el ángulo entre E y V.

2.1.6. Potencia reactiva

El valor de la potencia reactiva suministrado por una máquina síncrona se da por la ecuación 2.5

$$P = \frac{3EV}{X_s} \text{cos}\emptyset \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

E: fuerza electromotriz generado por la máquina antes de pasar por la reactancia síncrona.

V: voltaje en las terminales del generador.

X_s : reactancia síncrona de la máquina.

\emptyset : el ángulo entre E y V.

2.1.7. Conexión del neutro

Un generador puede tener por lo general una de las siguientes conexiones:

- a) Estrella
- b) Delta o
- c) Estrella aterrizada

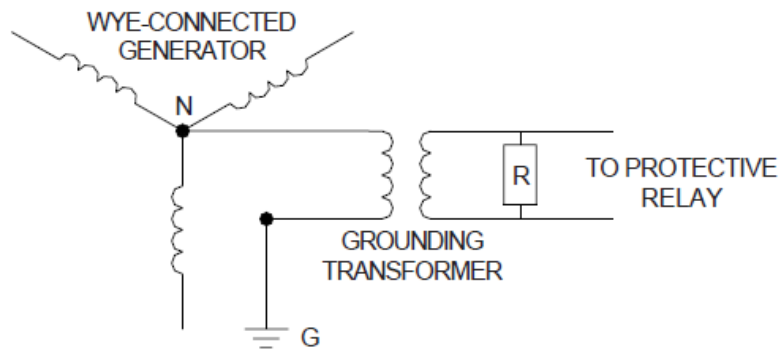
Con el fin de obtener la máxima protección diferencial (esta protección se explicará más adelante en el capítulo 4), el neutro del generador debe estar sólidamente aterrizado por medio de un resistor o un reactor.

2.1.8. Reactancia de puesta a tierra

La aplicación de las reactancias de puesta a tierra del neutro consiste en aumentar la impedancia en el neutro de un transformador o de una reactancia shunt. Durante las fallas monofásicas, la reactancia limita la intensidad de falla en el neutro, mejorando la restauración del servicio en la línea eléctrica.

En la figura 16 se muestran la conexión típica de puesta a tierra de un generador por medio de un transformador.

Figura 16. **Conexión de resistencia de puesta a tierra por medio de un transformador**



Fuente: Documento NGCAT00. Type NR *Neutral Grounding Resistors*. p. 3.

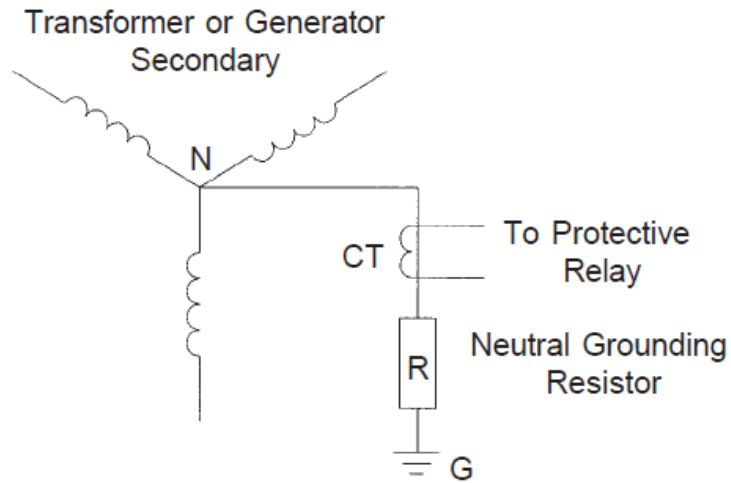
La densidad de corriente de diseño en el devanado está determinada por la capacidad de la reactancia para soportar los esfuerzos mecánicos provocados por la corriente de falta de breve duración. La reactancia puede ser de diseño seco o en baño de aceite.

2.1.9. Resistencia de puesta a tierra.

Son resistores limitadores de corriente de falla conectados en el lado estrella del generador o transformador con el fin de reducir los valores de corriente lo suficiente como para que puedan operar los relevadores de protección, evitando daños a los equipos.

En la figura 17 se muestran la conexión típica de puesta a tierra de un generador.

Figura 17. **Conexión de resistencia de puesta a tierra**



Fuente: Documento NGCAT00. Type NR Neutral Grounding Resistors p. 1.

2.2. Transformadores de potencia

Los transformadores son indispensables en la distribución de potencia de corriente alterna ya que puede convertir potencia eléctrica con condiciones dadas de corriente y tensión a la potencia equivalente, con otros valores.

2.2.1. Potencia nominal

El valor de potencia nominal junto con el valor de voltaje nominal tiene el propósito de establecer el flujo de corriente máximo a través de los devanados del transformador.

En los transformadores es común tener un valor en voltio-amperios (VA), para ventilación natural del transformador y otro más alto para el mismo transformador con ventilación forzada.

2.2.2. Límite de carga normal y emergencia

Se refiere a los valores a que está diseñado el transformador para trabajar. En forma general, el límite de carga normal se da con ventilación natural, mientras que el límite de carga de emergencia se da con ventilación forzada.

2.2.3. Estimación de la carga mínima, normal y emergencia

Se entiende por estimación de la carga los valores en que opera particularmente el circuito o circuitos en análisis conectados al transformador.

Carga mínima es cuando están conectadas al circuito las cargas que no se desenergizan en ningún momento.

Carga normal es cuando están conectadas al circuito las cargas con una operación habitual, es decir la mayor parte del tiempo estas cargas están conectadas al circuito.

Carga de emergencia es cuando debido a alguna eventualidad es necesario cargar al circuito otras cargas adicionales.

2.2.4. Voltaje primario y secundario

Como se explicó anteriormente, junto con la potencia aparente se establece el valor máximo de flujo de corriente en los devanados del transformador. Una segunda función del voltaje nominal en un transformador es indicar el voltaje de funcionamiento normal, para proteger el aislamiento del devanado de la aplicación de un voltaje excesivo.

Si por alguna razón se debe reducir el valor de tensión en un transformador debe entonces también reducirse el valor de potencia aparente del mismo en la misma proporción para evitar calentamientos excesivos en el transformador.

2.2.5. Número de tomas y porcentaje de paso

“Los transformadores por lo general tienen una serie de tomas llamados “*taps*” en los devanados para permitir pequeños cambios en la relación de vueltas del transformador”.²⁹

Por lo general, los transformadores de potencia tienen 5 *taps*, con porcentajes de paso de 2,5% por encima y por debajo del voltaje nominal.

2.2.6. Impedancia de secuencia directa y cero

La impedancia de secuencia directa o impedancia porcentual es la forma como presentan los fabricantes la impedancia equivalente y es un dato importante para el cálculo de las corrientes en caso de un corto circuito fortuito en la distribución eléctrica secundaria, la cual equivale a la regulación de tensión a plena carga.

La impedancia de secuencia cero depende de la forma de conexión del neutro en la cual pueden o no circular corrientes homopolares.

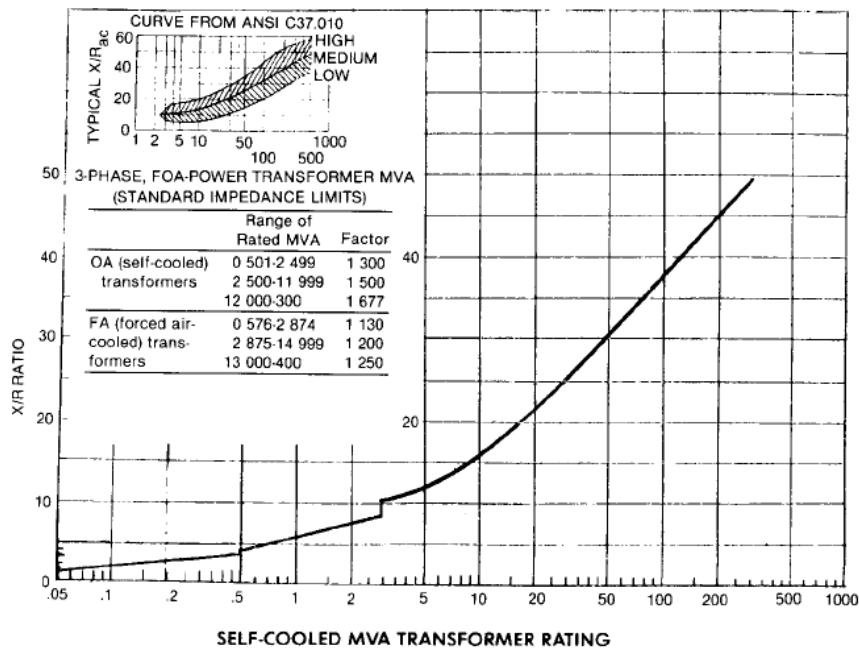
29 CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 108.

2.2.7. Relación X1/R1

Es la relación del valor de la reactancia y resistencia de secuencia positiva.

En la figura 18 se muestran los valores típicos en transformadores de potencia.

Figura 18. **Curva de relación típica X/R en transformadores de potencia. X1/R1**



Fuente: GET-3550F 0489 BLCFor industrial and commercial power system, GE. Short circuit current calculations. Appendix. p. 41.

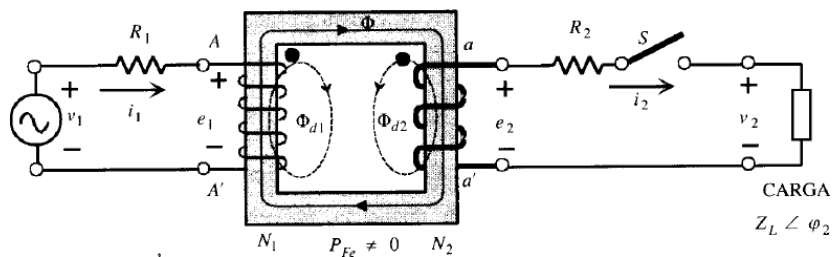
2.2.8. Resistencia primaria y secundaria

La aparición de resistencia es inherente a la constitución de los devanados con hilo conductor. En la figura 19 se muestra estas resistencias R_1 y R_2 que indican la resistencia primaria y secundaria del transformador respectivamente.

2.2.9. Reactancia primaria y secundaria

No todo el flujo producido por los devanados en un transformador, es común para ambos devanados sino que hay un flujo disperso, los cuales se distribuyen por caminos no magnéticos. Lo que da lugar a las reactancias de dispersión. En la figura 19 se muestra el flujo disperso primario Φ_{d1} y secundario Φ_{d2} respectivamente.

Figura 19. Resistencias y reactancias en un transformador



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 179.

2.2.10. Grupo de conexión

Las formas que más se emplean para realizar las conexiones de los arrollamientos son:

2.2.10.1. Conexión en estrella

En esta conexión se unen en un mismo punto los tres valores extremos de los arrollamientos que poseen la misma polaridad.

2.2.10.2. Conexión en delta o triángulo

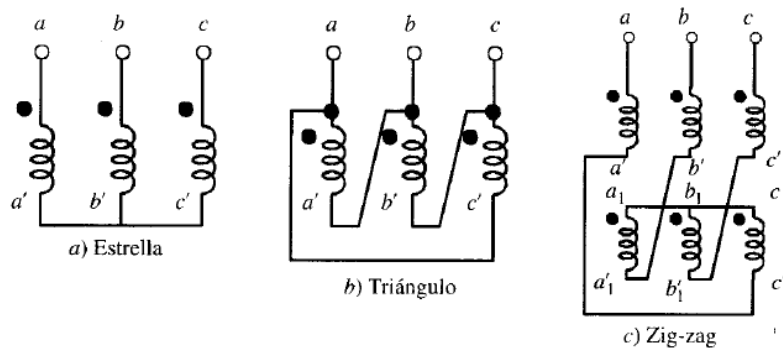
En esta conexión se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos devanados hasta cerrar el circuito.

2.2.10.3. Conexión en zigzag

Esta conexión sólo se emplea en el lado de menor tensión, la cual consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un determinado orden cíclico.³⁰

En la figura 20 se muestran las tres conexiones descritas con anterioridad.

Figura 20. Tipos de conexión en los transformadores trifásicos



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 206.

Dependiendo de los tipos de conexión de los devanados de un transformador trifásico, pueden aparecer unas diferencias de fase entre las tensiones compuestas de primario y secundario. Este desfase se mide en múltiplos de $30^\circ = 2\pi/12$ radianes, lo que permite identificarlos con los que forman entre sí

³⁰ FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*, p. 206.

las agujas de un reloj cuando marca una hora exacta, y esto da lugar al llamado "índice horario" del transformador.³¹

En la figura 21 se muestran algunos ejemplos de las conexiones típicas que se prefieren en el diseño nuevo de instalaciones.

Figura 21. **Conexiones más comunes en transformadores trifásicos**

0 (0°)	Dd0		6 (180°)	Dd6	
	Yy0			Yy6	
	Dz0			Dz6	
5 (150°)	Dy5		11 (330°)	Dy11	
	Yd5			Yd11	
	Yz5			Yz11	

Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 208.

2.2.11. Tipo de núcleo

Básicamente los transformadores se construyen en dos tipos que son tipo acorazados y tipo columnas.

³¹ FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 206.

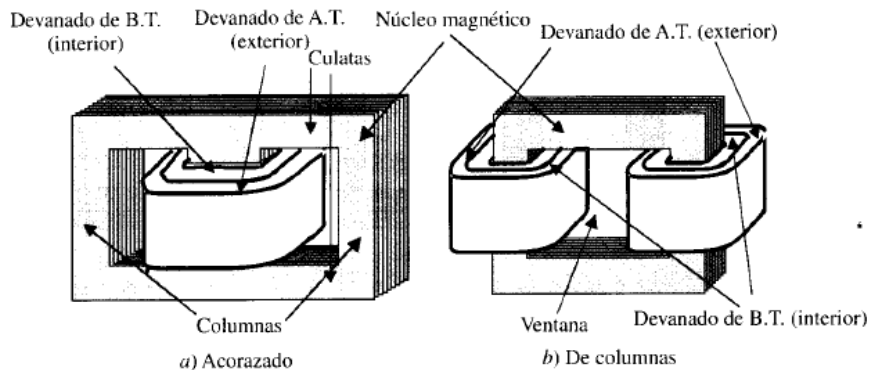
2.2.11.1. Tipo acorazados

“Los devanados están en su mayor parte abrazados o acorazados por el núcleo magnético”.³² Este tipo de núcleo se ilustra en la figura 22a.

2.2.11.2. Tipo columnas

“En este caso son los devanados los que rodean casi por completo el núcleo magnético. Este tipo es de construcción más sencilla y se adapta mejor a las altas tensiones, porque la superficie a aislarse es más reducida”.³³ Se ilustra en la figura 22b.

Figura 22. **Construcción de un transformador (a) tipo acorazado y (b) tipo columnas**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 163.

³² FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 163.

³³ *Ibíd.*

2.3. Conductores

Conductores: Los conductores de media tensión son parte integral de la infraestructura en los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

2.3.1. Voltaje nominal

Aquí nos referimos a los valores de tensión nominal indicados por el fabricante al cual puede ser sometido el conductor sin sufrir ningún daño.

2.3.2. Longitud

La longitud de un conductor es directamente proporcional a la resistencia del mismo, ya que la trayectoria que los electrones deberán recorrer será proporcional a la longitud de la línea.

2.3.3. Resistencia

La resistencia es la oposición que cualquier material ofrece al paso de la corriente eléctrica. La resistencia de cualquier elemento conductor depende de sus dimensiones físicas y de la resistividad, pudiéndose expresarse con la ecuación 2.6

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

R: es la resistencia eléctrica en ohmios (Ω) a 20°C

ρ : resistividad en ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

L: longitud del cable en m

A: área transversal del cable en mm²

2.3.4. Reactancia.

Básicamente la reactancia inductiva viene dada por la ecuación 2.7

$$X_l = 2\pi fl \qquad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

X_L : reactancia inductiva en Ω

2π : constante

f: frecuencia en Hz

l: longitud del conductor en m

Dependiendo de la disposición en que estén instalados los cables debe aplicarse otras ecuaciones que se verán más adelante.

2.3.5. Suceptancia

La admitancia es la facilidad que un circuito ofrece al paso de la corriente, la cual está formada por una parte real y una parte imaginaria, a la parte imaginaria le llamamos suceptancia, la cual se mide en siemens.

2.3.6. Tipo y calibre

A nivel mundial es común utilizar la nomenclatura de calibre de alambre estadounidense AWG (*american wire gauge*), y es una referencia de clasificación de diámetros. Cuanto más alto es este número, más delgado es el

alambre. El alambre de mayor grosor es menos susceptible a la interferencia, posee menos resistencia interna y, por lo tanto, soporta mayores corrientes a distancias más grandes.

La escala obedece prácticamente a los pasos sucesivos del proceso de estirado del alambre que existía en 1857 que fue cuando se creó esta nomenclatura. En la ecuación 2.8 se muestra el procedimiento de selección.

$$\sqrt[39]{\frac{0,4600}{0,0050}} = 1,1229 \quad \text{Ec. 2.8.}$$

Dónde: Los diámetros más grueso es de 0,4600 pulgadas (calibre 4/0), y más delgado es de 0,0050 pulgadas (calibre 36); se determinaron 39 dimensiones entre dichos calibres.

Es decir, la razón entre dos diámetros consecutivos en la escala AWG es constante e igual a 1,1229.

Por esta razón los pasos de los calibres con respecto al diámetro son regresivos, pues corresponden en realidad a los pasos del proceso de estirado del alambre. No obstante, para los calibres de mayor grosor, se optó la solución de identificarlos directamente por el área en el sistema inglés de medida:

- a) *Mil*, para los diámetros, es decir una milésima de pulgada.
- b) *Circular mil*, para las áreas, unidad que representa el área del círculo de un mil de diámetro, es decir, 0,7854 mils cuadrados.
- c) *kcmil*, para secciones de mayor área. Estas siglas también eran conocidas como *MCM* o *KCM*.

2.3.7. Capacidad nominal

Es la capacidad que tiene el conductor para transportar cierta cantidad de corriente eléctrica a través de él, la cual se mide en amperios.

2.3.8. Límite de carga

Es la corriente máxima que pasará por el conductor en base a la carga conectada al circuito donde está instalado.

2.4. Capacitores

Capacitores: La capacitancia puede definirse en términos generales como la propiedad de un circuito eléctrico, que le permite alcanzar energía eléctrica por medio de un campo electrostático y liberar esta energía posteriormente. Los dispositivos que introducen capacitancia a los circuitos se llaman capacitores. Los capacitores son aparatos fabricados para añadir deliberadamente capacitancia a un circuito.

2.4.1. Tipo de capacitor

En este caso nos referimos a si es un banco de capacitores fijo o variable.

2.4.2. Potencia / paso

La potencia reactiva capacitiva del banco de capacitores y en el caso de que sea un tipo variable la potencia en cada paso del banco.

2.4.3. Tipo de conexión

Cuando se trata de capacitores para una red trifásica los mismos pueden estar conectados en estrella o delta. En este punto, si la conexión está aterrizada debe darse también el valor de la resistencia y reactancia a tierra.

2.5. Interruptores de potencia / fusible

El interruptor de potencia es un dispositivo electromecánico cuya función principal es la de conectar y desconectar circuitos eléctricos bajo condiciones normales o de falla.

2.5.1. Capacidad interruptiva

Es la capacidad en kA del equipo de poder abrir el circuito bajo condiciones de una corriente alta, sin autodestruirse.

2.5.2. Tipo de barra

Se refiere a la clase de equipo al que están conectadas las cargas, entre ellos se pueden mencionar *switch gear*, *ampgard*, y otros.

2.6. Motores asíncronos

Está formado por un rotor y un estator, en el que se encuentran las bobinas son trifásicas y están desfasadas entre si tienen barras de conducción incrustadas en ranuras y conectadas con anillos en cada extremidad

2.6.1. Potencia

El límite de potencia lo determina la combinación de voltaje y corrientes nominales con el factor de potencia y eficiencia de las máquinas.

2.6.2. Voltaje

El límite de voltaje en el motor está basado en el máximo flujo de corriente de magnetización aceptable, puesto que mientras más alto sea el voltaje más saturado está el hierro del motor y más alta será la corriente de magnetización.

2.6.3. Velocidad

La velocidad de un motor de inducción está dada por la ecuación 2.9

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

n_s : velocidad síncrona en rpm

f : frecuencia eléctrica en Hz

P : número de polos

Un motor de inducción puede acelerar hasta llegar cerca de la velocidad síncrona, pero nunca puede llegar a ella, por lo que el rotor siempre girará a una velocidad menor.

La ecuación 2.10 muestra la velocidad del rotor.

$$n_m = (1 - s)n_s \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

n_m . velocidad mecánica del rotor en rpm

n_s . velocidad síncrona en rpm

s : deslizamiento de la máquina, que no es más que la velocidad relativa expresada como una fracción de la unidad o un porcentaje.

2.6.4. Número de polos

El campo magnético giratorio en el estator se puede representar con un polo norte y un polo sur. Estos polos magnéticos completan una rotación mecánica alrededor de la superficie del estator por cada ciclo eléctrico de la corriente aplicada. Por consiguiente, la velocidad mecánica de rotación del campo magnético en rpm es igual a la frecuencia eléctrica en Hz.

Para el devanado de cuatro polos, la frecuencia eléctrica de la corriente es dos veces la frecuencia mecánica de rotación. Por lo que relacionando las cantidades eléctricas y mecánicas se llega a la expresión que se muestra en la ecuación 2.8

2.6.5. Conexión

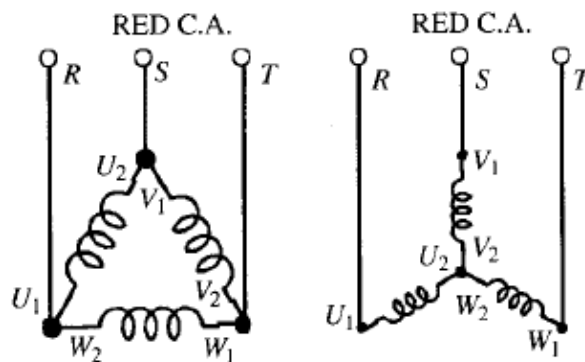
Los motores asíncronos tienen una caja de bornes donde se llevan los extremos de los bobinados para poder realizar en ella el tipo de conexión necesarios, que básicamente son dos:

- “La conexión en estrella, la cual se emplea cuando la máquina ha de conectarse a una tensión más elevada indicada en su placa de características y

- La conexión en delta cuando ha de conectarse en la tensión más baja”.³⁴

En la figura 23 se muestra las conexiones delta y estrella, respectivamente, en un motor asíncrono.

Figura 23. **Conexión delta y estrella en un motor asíncrono**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 263.

2.6.6. Tipo de rotor

Existen dos tipos diferentes de rotores de motores de inducción que pueden utilizarse dentro del estator, que son:

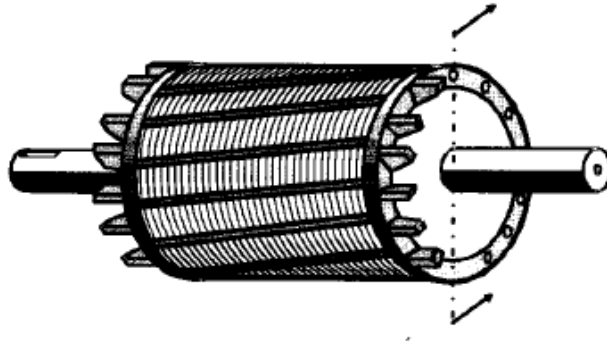
2.6.6.1. Rotor jaula de ardilla

“El rotor jaula de ardilla consta de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en corto circuito en alguno de sus extremos mediante grandes anillos de corto circuito”.³⁵

³⁴ FRAILE, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 262-263.

En la figura 24 se muestra un rotor jaula de ardilla

Figura 24. **Rotor jaula de ardilla**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 262.

2.6.6.2. **Rotor devanado**

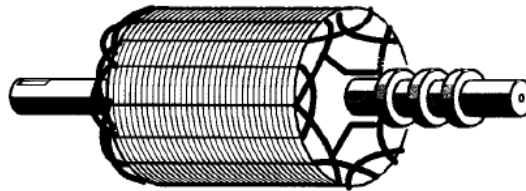
El rotor devanado tiene un conjunto completo de devanados trifásicos que son imágenes especulares de los devanados del estator. Las tres fases de los devanados del rotor normalmente están conectadas en estrella, y los tres alambres del rotor están unidos a anillos rozantes en el eje del rotor. Los devanados del rotor están en corto circuito por medio de escobillas montadas en los anillos rozantes, por lo que los rotores devanados de los motores de inducción tienen corrientes en el rotor accesibles en las escobillas del estator, donde se pueden examinar y donde es posible insertar una resistencia extra en el circuito del rotor.³⁶

En la figura 25 se muestra un rotor devanado.

³⁵ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 380.

³⁶ *Ibíd.* p. 382.

Figura 25. Rotor devanado



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p. 26.

2.7. Valores usados en el cálculo de fallas de equipos en el Ingenio

En la tabla I se muestran los datos más relevantes de los generadores instalados en el Ingenio.

Tabla I. Datos en placa de generadores síncronos del Ingenio

Generador	Voltaje Nominal	Potencia Nominal	Factor de Potencia	Número de polos	Potencia Activa	Conexión del Neutro	Resistencia de puesta a tierra (Rg)	Reactancia de puesta a tierra (Xg)
	V	MVA			MW	Yg, Y, Δ	Ohmios	Ohmios
G1	480	2,500	0,8	6	2,00	Yg		
G2	2 400	6,250	0,8	2	5,00	Yg	0,60	
G3	4 800	10,714	0,7	2	7,50	Yg	0,69	0,016
G4	13 800	30,000	0,5	2	26,00	Yg	0,69	0,020
G5	13 800	12,500	0,8	2	10,00	Yg		0,212
G6	13 800	26,075	0,9	4	23,47	Yg		0,260
G7	13 800	27,500	0,8	4	22,00	Yg	796,00	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla II y III se muestran los datos más relevantes de los transformadores de potencia instalados en el Ingenio.

Tabla II. Datos de transformadores del Ingenio parte A

Transformador	Potencia Nominal	Límite de carga emergencia	Estimación de la carga máxima	Estimación de la carga media	Voltaje Primario	Voltaje Secundario
	MVA	MVA	MVA	MVA	V	V
T1	15,0	22,400	5,5		69 000	13 800
T2	22,0	31,600	13,0	10,500	69 000	13 800
T3	22,0	31,600	32,0	28,000	69 000	13 800
T4	25,0	37,240	26,0	20,000	69 000	13 800
T5	7,5	10,000	5,5	5,500	13 800	2 400
T6	2,5	3,125	2,0	1,500	13 800	480
T7	1,5	2,150		0,970	13 800	480
T8	0,5				13 800	
T9	12,0	17,250	0,5	0,402	13 800	4 160
T10	10,0	12,500		4,830	13 800	2 400
T11	12,0	12,000	7,5	7,000	13 800	4 800
T12	10,0	12,500	8,0	7,100	13 800	2 400
T13	2,5	3,500		1,000	13 800	480
T14	1,5	1,932		0,700	13 800	480
T15	1,5	2,150		0,600	13 800	480
T16	1,0	1,120		0,500	13 800	480
T17	1,5	2,150		0,600	13 800	480
T18	1,5	2,150		0,500	13 800	480
T19	0,5				13 800	
T20	1,5	2,150		0,400	13 800	480
T21	1,5	1,932	1,5	1,100	13 800	480
T22	1,5	1,932		0,700	13 800	480

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos de transformadores del Ingenio parte B**

Transformador	Número de tomas	Porcentaje de Paso	Impedancia secuencia Directa (Z1)	Relación (X1/R1)	Grupo de conexión	Tipo Núcleo
		%	%			
T1	5	1,025	10,80	14,00	Ynd1	Columnas
T2	5	1,025	7,87	23,00	Ynd1	Columnas
T3	5	1,025	7,88	23,00	Ynd1	Columnas
T4	5	1,025	7,80	23,50	Ynd1	Columnas
T5	5	1,026	5,50	13,00	Dd0	Columnas
T6	5	1,026	8,23	5,35	Ynd1	Columnas
T7	5	1,026	5,91	4,50	dYn1	Columnas
T8			1,23		Yzg	Columnas
T9	5	1,026	5,05	17,00	Dyn1	Columnas
T10	5	1,026	6,70	16,00	Dd0	Columnas
T11	5	1,026	6,60	17,00	Ynd1	Columnas
T12	5	1,026	6,60	16,00	Dd0	Columnas
T13	5	1,020	5,73	5,35	Dyn1	Columnas
T14	5	1,025	5,49	4,50	Dyn1	Columnas
T15	5	1,026	5,79	4,50	Dyn1	Columnas
T16	5	1,025	6,10	4,10	Dyn1	Columnas
T17	5	1,025	5,90	4,50	Dyn1	Columnas
T18	5	1,026	5,87	4,50	Dyn1	Columnas
T19			1,23		Yzg	Columnas
T20	5	1,026	5,79	4,50	Dyn1	Columnas
T21	5	1,025	5,50	4,50	Dyn1	Columnas
T22	5	1,026	5,77	4,50	Dyn1	Columnas

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV, V y VI se muestran los datos más relevantes de los conductores instalados en el Ingenio.

Tabla IV. Datos de conductores del Ingenio parte A

Conductor	Voltaje Nominal	Resistencia Sec. Positiva (R1)	Reactancia Sec. Positiva (X1)	Susceptancia Sec. Positiva (B1) *
	V	Ohmios	Ohmios	Siemens
L1	69 000	0,000 619 26	0,002 395 00	-391,391 900 00
L2	69 000	0,001 576 96	0,006 099 00	-153,686 320 00
L3	69 000	0,001 576 96	0,006 099 00	-153,686 320 00
L4	69 000	0,001 576 96	0,006 099 00	-153,686 320 00
L5	69 000	0,001 560 16	0,006 030 00	-1 554,344 000 00
L6	13 800	0,026 949 12	0,025 449 60	-18,523 117 20
L7	13 800	0,002 233 00	0,002 108 75	-223,547 564 00
L8	13 800	0,003 933 27	0,003 714 41	-126,912 649 00
L9	13 800	0,010 796 94	0,013 765 50	-44,976 048 50
L10	13 800	0,053 541 52	0,012 832 00	-4,233 091 06
L11	13 800	0,006 156 70	0,005 814 13	-81,079 431 20
L12	13 800	0,007 644 02	0,001 832 00	-29,650 122 50
L13	13 800	0,054 342 64	0,013 024 00	-4,170 686 77
L14	13 800	0,004 573 06	0,001 096 00	-49,561 153 70
L15	13 800	0,093 196 96	0,022 336 00	-2,4319 047 50
L16	13 800	0,009 146 12	0,002 192 00	-24,780 576 90
L17	13 800	0,072 879 67	0,017 466 67	-3,109 868 07
L18	13 800	0,000 618 86	0,000 584 43	-806,615 314 00
L19	13 800	0,027 753 00	0,026208 75	-17,986 585 60
L20	13 800	0,008 676 80	0,008194 00	-57,530 623 00
L21	13 800	0,001 786 40	0,001 687 00	-279,434 454 00
L22	13 800	0,002 990 09	0,002 823 72	-166,945 214 00
L23	13 800	0,001 939 52	0,001 831 60	-257,373 840 00
L24	13 800	0,000 861 30	0,000 813 38	-579,567 757 00
L25	13 800	0,000 829 40	0,000 783 25	-602,012 276 00
L26	2 400	0,000 316 45	0,000 53072	-1 390,036 020 00
L27	480	0,000 629 49	0,000 925 00	-738,884 912 00
L28	4 800	0,000 663 52	0,001 112 80	-662,940 257 00
L29	13 800	0,006 742 76	0,001 616 00	-33,613 257 70

Continuación de la tabla IV.

L30	13 800	0,268 842 52	0,064 432 00	-0,843 044 21
L31	13 800	0,204 485 88	0,049 008 00	-1,108 370 56
L32	13 800	0,010 080 76	0,002 416 00	-22,792 745 00
L33	13 800	0,010 548 08	0,002 528 00	-21,486 955 90
L34	13 800	0,105 480 80	0,025 280 00	-2,148 695 59
L35	13 800	0,030 692 76	0,017 860 80	-14,163 393 80
L36	13 800	0,018 091 96	0,004 336 00	-12,527 450 30
L37	13 800	0,050 136 76	0,012 016 00	-4,520 557 96
L38	13 800	0,016 456 34	0,003 944 00	-13,772 572 10
L39	13 800	0,100 039 86	0,023 976 00	-2,265 558 24

Fuente: elaboración propia.

*La susceptancia está calculada de la siguiente forma: $Z = R + jX$, luego $Y = 1 / Z = G + jB$

Tabla V. **Datos de conductores del Ingenio parte B**

Conductor	Longitud	Tipo y calibre del conductor de Fase	Capacidad Nominal del Conductor	Límite de Carga Nominal
	M		A	A
L1	5,16	1 * 477 kcmil Hawk ACSR	659	
L2	13,14	1 * 477 kcmil Hawk ACSR	659	187,00
L3	13,14	1 * 477 kcmil Hawk ACSR	659	184,10
L4	13,14	1 * 477 kcmil Hawk ACSR	659	184,10
L5	13,00	1 * 477 kcmil Hawk ACSR	659	209,45
L6	211,20	1 * 350 kcmil, mv-105	440	627,50
L7	70,00	4 * 350 kcmil, mv-105	1 760	920,00
L8	123,30	4 * 350 mcm, mv-90	1 740	920,40
L9	119,70	4 * 500 kcmil, mv-90	2 140	1 045,00
L10	240,60	3 * 2 awg, mv-105	495	
L11	193,00	4 * 350kcmil mv-105	1 760	
L12	22,90	2 * 2 awg, mv-105	330	265,00

Continuación de la tabla V.

L13	244,20	3 * 2 awg, mv-105	495	310,90
L14	13,70	2 * 2 awg, mv-105	330	104,80
L15	139,60	1 * 2 awg, mv-105	165	62,72
L16	13,70	1 * 2 awg, mv-105	165	
L17	327,50	3 * 2 awg, mv-105	495	167,32
L18	9,70	2 * 350 kcmil mv-105	880	502,00
L19	870,00	4 * 350 kcmil, mv-105	1 760	1 151,00
L20	136,00	2 * 350 mcm, mv-90	870	435,80
L21	28,00	2 * 350 kcmil, mv-105	880	418,90
L22	70,30	3 * 350 kcmil, mv-105	1 320	1 092,20
L23	15,20	1 * 350 kcmil, mv-90	435	166,82
L24	13,50	2 * 350 mcm, mv-90	870	502,00
L25	13,00	2 * 350 mcm, mv-90	870	435,80
L26	12,40	5 * 350 kcmil, mv-105	2 200	1 505,00
L27	14,80	11 * 350 kcmil, mv-105	3 410	3 007,00
L28	10,40	4 * 350 mcm, mv-90	1 580	1 290,00
L29	10,10	1 * 2 awg, mv-105	165	104,30
L30	402,70	1 * 2 awg, mv-105	165	143,70
L31	306,30	1 * 2 awg, mv-105	165	62,90
L32	15,10	1 * 2 awg, mv-105	165	62,76
L33	15,80	1 * 2 awg, mv-105	165	41,80
L34	158,00	1 * 2 awg, mv-105	165	62,76
L35	73,20	1 * 1/0 awg, mv-90	215	62,60
L36	27,10	1 * 2 awg, mv-105	185	20,40
L37	75,10	1 * 2 awg, mv-90	165	62,76
L38	24,65	1 * 2 awg, mv-105	165	81,00
L39	149,85	1 * 2 awg, mv-105	165	62,70

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII y IX se muestran los datos más relevantes de los interruptores instalados en el Ingenio.

Tabla VI. **Datos de Interruptores y fusibles de protección del Ingenio**

Descripción	Capacidad Interruptiva	Tipo
	A	Switch gear / SF6 / Swtich Cuchillas
I1	31 500	SF6
I2	40 000	SF6
I3	31 500	SF6
I4	31 500	SF6
I5	31 500	SF6
I6	25 000	Swg
I7	25 000	Swg
I8	18 000	Swg
I9	18 000	Swg
I10	25 000	Swg
I11	25 000	Swg
I12	25 000	Swg
I13	25 000	Swg
I14	25 000	Swg
I15	25 000	Swg
I16	18 000	Swg
I17	18 000	Swg
I18	18 000	Swg
I19	18 000	Swg
I20	25 000	Swg
I21	25 000	Swg
I22	25 000	Swg
I23	25 000	Swg
I24	25 000	Swg
I25	25 000	Swg
I26	25 000	Swg
I27	25 000	Cuchillas
I28	25 000	Cuchillas
I29	25 000	Cuchillas
I30	25 000	Cuchillas
I31	25 000	Cuchillas
I32	25 000	Cuchillas
I33	25 000	Cuchillas
I34	25 000	Cuchillas
I35	25 000	Cuchillas
I36	38 000	Cuchillas
I37	38 000	Cuchillas

Fuente: elaboración propia.

3. MÉTODOS DE CÁLCULOS PARA DETECCIÓN DE FALLAS

Existen variados métodos de cálculos de fallas, a continuación se presentan 4 de estos métodos para el cálculo de coroto circuito en sistemas de potencias, los cuales se enumeran a continuación.

3.1. Método de superposición

En el método de superposición o mejor conocido como teorema de superposición, todos los elementos de la matriz de impedancias se toman en cuenta para los respectivos cálculos. Este método sólo es aplicable a circuitos eléctricos lineales.

El método de superposición permite calcular la corriente o el voltaje en cualquier rama de un circuito estimulado por varias fuentes de energía, ya sean de corriente o de voltaje. De acuerdo a este teorema, el valor de la corriente o del voltaje en una rama de un circuito estimulado por varias fuentes se produce por la superposición de los estímulos de cada una de ellas.

Procedimiento para el cálculo de fallas por el método de superposición

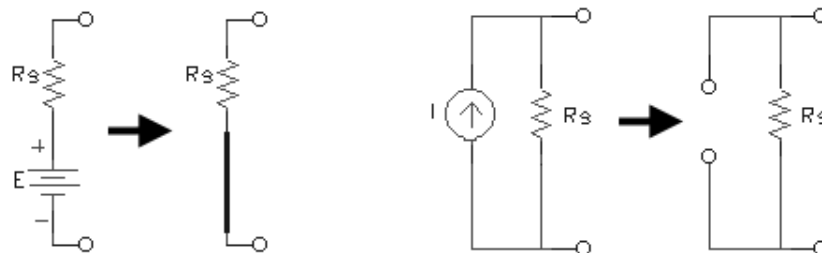
- 1) Se debe estimular el circuito con una sola fuente, calculando los valores de las corrientes y voltajes en todas las ramas del circuito.
- 2) Luego se realiza el cálculo estimulando nuevamente el circuito con la siguiente fuente de energía, manteniendo el resto de ellas desactivadas

como en el primer caso y así sucesivamente hasta calcular los valores de corrientes y voltajes con todas las fuentes existentes.

- 3) Finalmente se calculan las corrientes y voltajes en las ramas a partir de la suma algebraica de los valores parciales obtenidos para cada fuente.

En la figura 26 se muestra la forma de desactivar las fuentes; las de corriente se sustituyen por un corto circuito y las de voltaje por un circuito abierto.

Figura 26. **Fuentes de voltaje y corriente desactivadas**



Fuente: www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/apuntes/03/03.htm

Consulta: enero de 2016.

Como se puede inferir en circuitos complejos no resulta práctico el uso de este método pero el mismo valida, por ejemplo, realizar cálculos por separado en un circuito estimulado con corrientes directa y alterna a la vez, como son los circuitos con elementos activos (transistores, circuitos operacionales, etc.), así como los estimulados con señales no sinusoidales.

3.2. Método del Equivalente de Thévenin

Con el fin de poder efectuar los cálculos de cortocircuito en los sistemas eléctricos, se hace necesario transformar la representación del sistema original (diagrama unifilar), a un sistema equivalente en el cual las impedancias de todos los elementos queden referidas a una base común de tensión, o bien a una base común de potencia.

Según enuncia el teorema de Thévenin, cualquier sistema se puede reducir a una sola impedancia en el punto de falla por combinaciones sucesivas serie o paralelo o por transformaciones delta-estrella alimentada por una fuente de tensión en serie.³⁷

Procedimiento para el cálculo de fallas por el método de Thévenin

Los pasos a seguir para efectuar el cálculo por el método de Thévenin son los siguientes:

1) Trazar un diagrama unifilar mostrando todas las fuentes de cortocircuito y todos los elementos de impedancia. El diagrama unifilar debe incluir el suministro del exterior, generadores, motores síncronos y de inducción, así como los elementos importantes por su impedancia tales como transformadores, reactores, cables, barras conductoras e interruptores.

2) Seleccionar una base apropiada en MVA que sea común para todos los niveles de tensión. Se recomienda el empleo de magnitudes como 1, 10, 100, etc. Se seleccionan niveles de tensión básicos distintos para cada nivel de tensión nominal. También se seleccionan los niveles de tensión de los transformadores de mayor capacidad y los niveles de tensión más elevados como valores base.³⁸

3) Obtener los valores correctos de reactancia preferentemente de la información proporcionada por el fabricante. En su defecto podemos obtener valores típicos lo más cercano a los de nuestro equipo.

4) Trazar un diagrama de reactancias convirtiendo el diagrama unifilar a valores unitarios sobre una base seleccionada. Las ecuaciones para una base adecuada se muestran en las ecuaciones 3.1 a 3.6 y en la ecuación 3.7 se muestra el valor referido a valores por unidad (pu).

³⁷ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de c ortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 40.

³⁸. Ibíd. p. 41.

$$\text{Corriente base } A = \frac{KVA_{1\phi}}{\text{tensión base en } KV_{LN}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{\text{tensión base } V_{LN}}{\text{Corriente base en } A} \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{(\text{tensión base en } KV_{LN})^2 * 1000}{kVA_{LN} \text{ base}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{(\text{tensión base en } KV_{LN})^2}{MVA_{1\phi} \text{ base}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\text{Potencia base en } KW_{1\phi} = KVA_{1\phi} \text{ base} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\text{Potencia base en } MW_{1\phi} = MVA_{1\phi} \text{ base} \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$\text{Impedancia pu de un elemento del circuito} = \frac{\text{Impedancia real } \Omega}{\text{Impedancia base } \Omega} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Se usan principalmente magnitudes de reactancias, debido a que generalmente la resistencia de los componentes de los sistemas corresponde a un reducido porcentaje de la reactancia de los componentes considerados en el cálculo, y se comete un error insignificante al despreciarla. Esto es aplicable a sistemas de media y alta tensión, pero para sistemas eléctricos de baja tensión si es necesario tomar en cuenta los valores de resistencia de los elementos considerados en el estudio de cortocircuito.

5) Integrar todas las reactancias en una única equivalente que incluya todas las reactancias entre la barra conductora de reactancia cero y el punto de falla. La reactancia total equivalente expresada unitariamente sobre una base seleccionada, se usa para determinar la corriente de cortocircuito y los KVA en el punto de falla.

6) Determinar el valor de la corriente simétrica de cortocircuito o KVA.

7) Determinar el valor de la corriente asimétrica de cortocircuito o KVA

8) Determinar la potencia de cortocircuito en el punto de falla ya que es la magnitud requerida para la selección de dispositivos de protección como el interruptor.³⁹

³⁹ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de cortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 41.

3.3. Método de los MVA

Donde no es necesario considerar la resistencia de los elementos que integran el sistema, se puede emplear un método sencillo para calcular la potencia de cortocircuito simétrico en MVA y a partir de este valor calcular la corriente de cortocircuito. Este método es ampliamente utilizado para análisis de sistemas eléctricos de potencia en donde los niveles de tensión son altos. Para este método se deben seguir los siguientes pasos:

1) Convertir la impedancia de los equipos, de las líneas y alimentadores directamente a MVA de cortocircuito.

2) Dibujar dentro de rectángulos o círculos todos los MVA de cortocircuito de equipos, alimentadores y líneas siguiendo el mismo arreglo que éstos tienen en el diagrama unifilar.

3) Sucesivamente combinar los MVA de cortocircuito del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla.

- a) Los valores en paralelo se suman directamente, de acuerdo a la ecuación 3.8.

$$MVA_1 + MVA_2 + MVA_n \quad \text{Ec. 3.8}$$

- b) Los valores en serie se combinan como si fueran impedancias en paralelo, de acuerdo a la ecuación 3.9.

$$\frac{1}{\frac{1}{MVA_1} + \frac{1}{MVA_2} + \frac{1}{MVA_n}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

4) Calcular la corriente de cortocircuito trifásica, en amperios, para el punto de falla.⁴⁰

3.4. Método de las componentes simétricas

El método de las componentes simétricas es ampliamente utilizado en el cálculo de corrientes de falla en sistemas de media y alta tensión, y a diferencia de los métodos de equivalente de Thévenin y los MVA, este permite efectuar el cálculo de fallas desbalanceadas en los sistemas eléctricos, también proporciona un punto muy explícito que permite apreciar perfectamente; porque en ocasiones las corrientes de falla monofásicas pueden ser más grandes y por lo tanto más peligrosas y potencialmente destructivas en un sistema eléctrico, que las fallas trifásicas. Esto se observa una vez que el diagrama de secuencia cero es elaborado.⁴¹

⁴⁰ Ibíd.

⁴¹ . Ibíd. p. 50.

A continuación se procede a explicar este método.

3.4.1. Impedancias de secuencia

“Según el teorema de Fortescue, tres vectores desequilibrados de un sistema trifásico pueden descomponerse en tres sistemas equilibrados de vectores. Los conjuntos equilibrados de componente son”.⁴²

3.4.1.1. Componentes de secuencia positiva

“Están formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120^0 y con la misma secuencia de fases que los vectores originales”.⁴³

3.4.1.2. Componentes de secuencia negativa

“Están formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fases de 120^0 y con la secuencia de fases opuestas a la de los vectores originales”.⁴⁴

3.4.1.3. Componentes de secuencia cero

“Están formados por tres vectores de igual módulo y con una diferencia de fase nula.

Los conjuntos de componentes simétricos se designan con el componente subíndice 1 para los componentes de secuencia positiva, 2 para los

⁴² GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de circuitos a sistemas eléctricos*. p. 54-55.

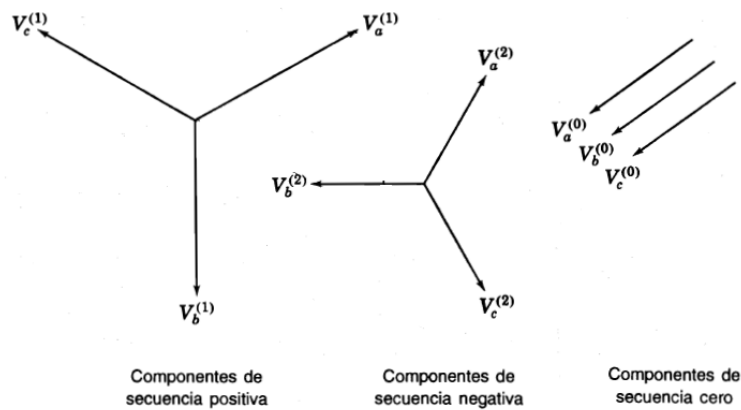
⁴³ STEVENSON, William D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. p.271.

⁴⁴. *Ibíd.*

componentes de secuencia negativa y 0 para los componentes de secuencia cero".⁴⁵

En la figura 27 se muestran los vectores de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente.

Figura 27. Componentes de secuencia



Fuente: STEVENSON JR., William D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. p. 271.

Los vectores expresados en función de sus componentes los dan las ecuaciones 3.10 a 3.12.

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Las impedancias de secuencia positiva y negativa de circuitos lineales, simétricos y estadísticos son idénticas, porque la impedancia de tales circuitos

⁴⁵ STEVENSON, William D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. p. 271.

es independiente del orden de fase, a condición de que las tensiones aplicadas estén equilibradas.

3.4.2. Ecuaciones para el cálculo de fallas simétricas

Una falla trifásica a través de impedancias se puede calcular muy simple como un circuito monofásico.

Asumiendo que se tiene la misma impedancia entre cada línea y el punto común solo circularan corrientes de secuencia positiva.

La tensión en la falla lo da la ecuación 3.13.

$$V_a = I_{a1}Z_1 \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde:

V_a : es la tensión en el punto de falla instantes antes de que ocurra la falla.

I_{a1} : La corriente que circulará en el punto de falla.

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva.

De manera que la corriente de secuencia positiva viene dada por la ecuación 3.14.

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde:

I_{a1} : es el valor de corriente en el punto de falla.

V_f : es el voltaje en el punto de falla instantes antes que ocurra la falla.

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva

Z_f : es la impedancia de falla

3.4.3. Ecuaciones para el cálculo de fallas asimétricas

La mayor parte de las fallas en los sistemas de energía son asimétricas y pueden consistir en cortocircuitos asimétricos, fallas asimétricas a través de impedancias, o conductores abiertos. Las ecuaciones siguientes, que luego se pueden generalizar, corresponden a casos donde se tiene un generador en vacío con el neutro conectad a tierra.

Las fallas asimétricas se presentan como:

3.4.3.1. Falla fase a tierra

En esta falla existen las siguientes relaciones (ver figura 6):

$$I_b = 0 \qquad I_c = 0 \qquad V_a = 0$$

De manera que para una falla fase a tierra la corriente de secuencias viene dada por las ecuaciones 3.15 y 3.16

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \qquad \text{Ec. 3.15}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \qquad \text{Ec. 3.16}$$

Donde:

I_{a1} : es el valor de corriente en el punto de falla.

V_f : es el voltaje en el punto de falla instantes antes que ocurra la misma.

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva.

Z_2 : es la impedancia de secuencia negativa.

Z_0 : es la impedancia de secuencia cero.

3.4.3.2. Falla fase a fase

En esta falla existen las siguientes relaciones (ver figura 7).

$$V_b = V_c \quad I_c = -I_b \quad I_a = 0$$

A partir de lo cual se llega a las ecuaciones 3.17 y 3.18.

$$V_{a1} = V_{a2} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde:

I_{a1} : es el valor de corriente en el punto de falla.

V_f : es el voltaje en el punto de falla instantes antes que ocurra la misma.

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva

Z_2 : es la impedancia de secuencia negativa.

3.4.3.3. Falla dos fases a tierra

En esta falla existen las siguientes relaciones (ver figura 8).

$$I_a = 0 \qquad V_b = V_c = 0 \qquad V_a = 0$$

De manera que para una falla fase a tierra la corriente de secuencias viene dada por las ecuaciones 3.19 y 3.20.

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \qquad \text{Ec. 3.19}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \qquad \text{Ec. 3.20}$$

Donde:

I_{a1} : es el valor de corriente en el punto de falla.

V_f : es el voltaje en el punto de falla instantes antes que ocurra la misma.

Z_1 : es la impedancia de secuencia positiva

Z_2 : es la impedancia de secuencia negativa.

Z_0 : es la impedancia de secuencia cero.

3.4.4. Procedimiento para el cálculo de fallas por el método de componentes simétricos

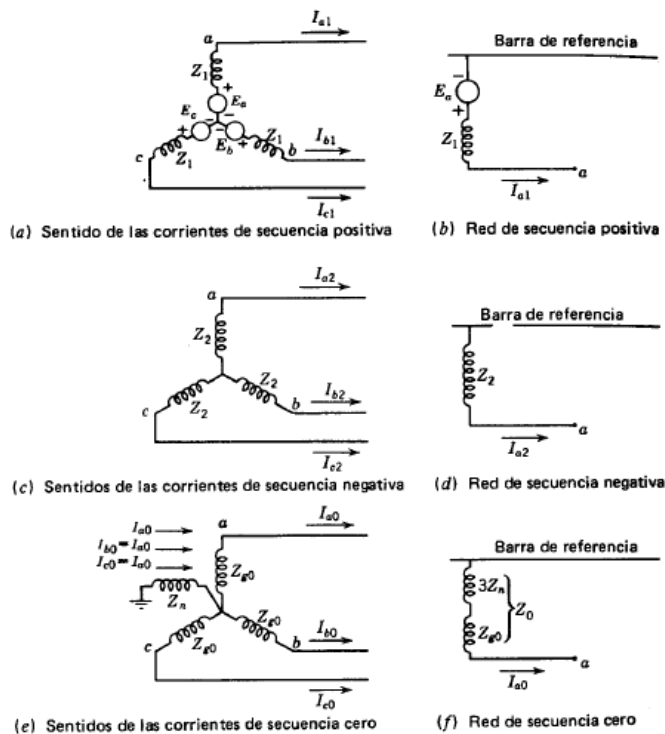
El procedimiento para obtener valores de corrientes y potencias de falla, empleando este método de cálculo es el siguiente:

1) Expresar los valores de reactancia de los elementos considerados en el cálculo en el sistema en por unidad estableciendo magnitudes base de tensión y potencia.

2) Dibujar las redes de secuencia positiva, negativa y cero, tomando especial atención en el tipo de conexión de las maquinas eléctricas para la elaboración del diagrama de secuencia cero.⁴⁶

En la figura 28 se muestra las redes de secuencia positiva, negativa y cero para una carga conectada en estrella. Y en la figura 29 se muestra las redes de secuencia cero para transformadores según el tipo de conexión.

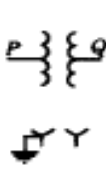
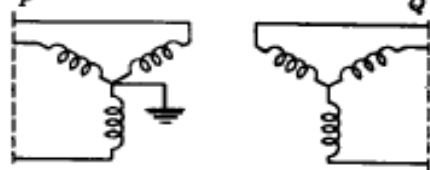
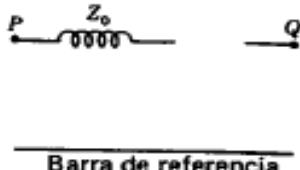

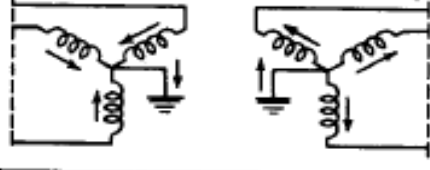
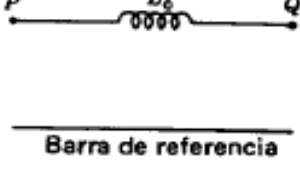
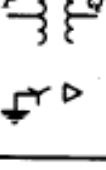
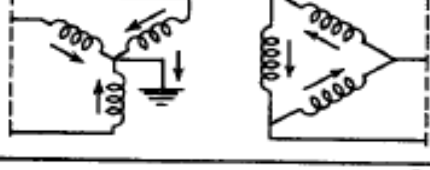
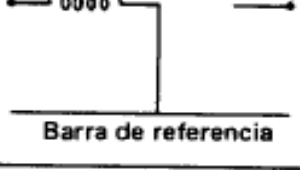

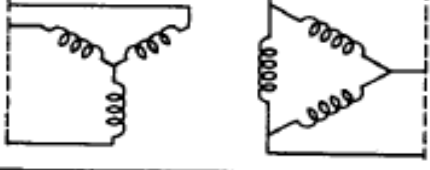
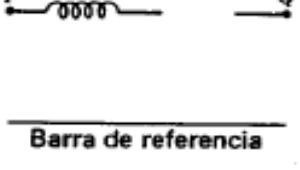
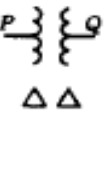
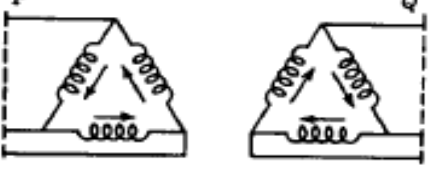
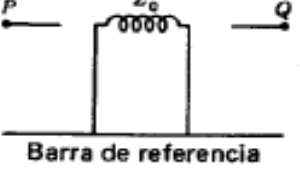
Figura 28. Trayectoria para la corriente de cada secuencia en un generador y sus respectivas redes de secuencia



Fuente: STEVENSON JR., William D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. p. 289.

⁴⁶ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de cortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 55.

Figura 29. Esquemas de conexión y símbolos para diagramas unifilares

SÍMBOLOS	ESQUEMAS DE CONEXIONES	CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA CERO
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>

Fuente: STEVENSON JR., William D. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. p. 295.

- 3) “Reducir las redes de secuencia a su equivalente de Thévenin, en el punto de falla.

- 4) Aplicar la ecuación correspondiente según el tipo de falla para obtener el valor de corriente de falla⁴⁷ (ver ecuaciones 3.13 a 3.20).

3.5. Método de la matriz de impedancias de barra

“Cuando se tienen sistemas de potencia trifásicos con “n” número de barras, es conveniente calcular las corrientes y tensiones de falla por medio del método de la matriz de impedancias de barra, el cual se basa en las ecuaciones de nodos, en donde se considera como nodo a las barras existentes en el sistema, como se muestran a continuación, llamadas ecuaciones de nodo”:⁴⁸

$$\begin{aligned}
 I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12} + Y_{13} + \dots + Y_{1n} \\
 I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22} + Y_{23} + \dots + Y_{2n} \\
 I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32} + Y_{33} + \dots + Y_{3n} \\
 &+ \\
 &+ \\
 I_m &= Y_{m1}V_1 + Y_{m2} + Y_{m3} + \dots + Y_{mn}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3.21}$$

De tal manera que la corriente de la fuente hacia el nudo m de una red con n nudos independientes viene dada por la ecuación 3.21

$$I_m = \sum_{j=1}^n Y_{mj}V_j
 \tag{Ec. 3.22}$$

El procedimiento para obtener corriente y potencia de falla en un sistema eléctrico por medio del método de la matriz de impedancias es el siguiente:

- 1) A partir del diagrama unifilar del sistema bajo análisis, identificar el número de barras que componen al sistema.

⁴⁷ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de c ortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 55.

⁴⁸ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de c ortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 65.

2) Expresar las reactancias en el sistema en por unidad refiriendo los valores a una unidad base, preferentemente de tensión y potencia.

3) Reducir a una única impedancia equivalente por el método de equivalente de Thévenin a dos o más impedancias que se encuentren conectadas a un sólo lado de barra.

4) Elaborar el diagrama de secuencia positiva del sistema eléctrico bajo estudio.

5) Expresar los valores de reactancia en sus valores equivalentes de admitancia.

6) Construir la matriz de admitancias, a partir del diagrama de secuencia positiva.

7) Invertir la matriz de admitancias, empleando cualquier modelo matemático.

8) Con el valor obtenido de impedancia equivalente en el punto de falla, calcular los valores de corriente y potencia de cortocircuito.⁴⁹

3.6. Método de cálculo utilizado en el Ingenio

Método de cálculo utilizado en Ingenio: En base a los métodos de cálculo para fallas en los sistemas eléctricos de potencia considerados anteriormente se decidirá el más conveniente

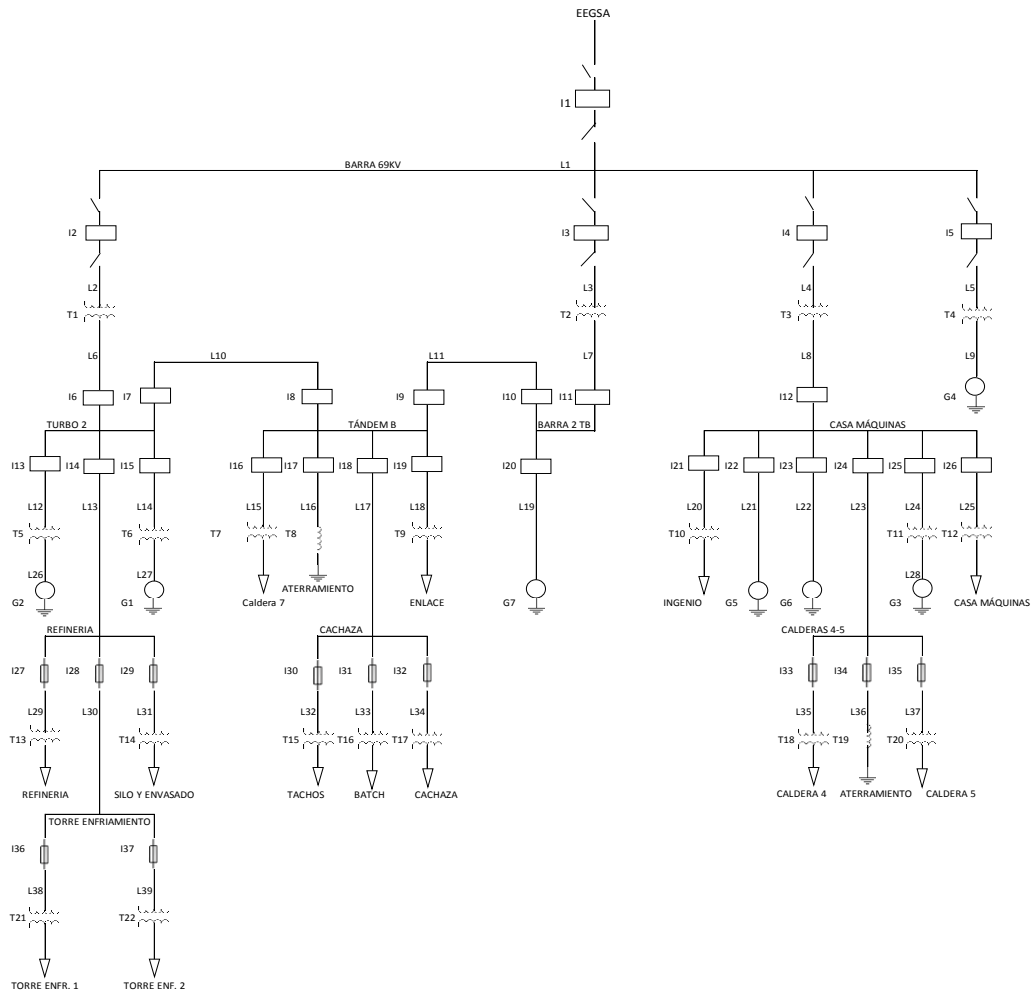
3.6.1. Diagrama unifilar utilizado

Al examinar los pasos de cada uno de los métodos para cálculo de fallas necesitamos el diagrama unifilar primordialmente para decidir que método es el más conveniente a utilizar, ya que en el mismo podremos ver los niveles de tensión, potencia y la cantidad de circuitos a analizar entre otras cosas.

En la figura 30 se muestra el diagrama unifilar del sistema de potencia de 69 000 V a 13 800 V utilizado.

⁴⁹ GONZÁLES, Gabriel, LUNA, Enrique Oswaldo. *Análisis de cortocircuito a sistemas eléctricos*. p. 66-67.

Figura 30. Diagramas unifilar 69 000 a 13 800 V



Fuente: Ingenio La Unión.

Utilizaremos el método impedancias de barra, por la cantidad de barras y elementos que se tienen en el ingenio.

3.6.2. Pasos realizados en el cálculo

A partir del diagrama unifilar del sistema bajo análisis, identificar el número de barras que componen al sistema.

En la tabla X se muestra las barras del diagrama unifilar en análisis.

Tabla VII. **Identificación de barras**

BARRA	Nombre de la barra
1	Barra Subestación
2	Barra Turbo 2
3	Barra Tándem B
4	Barra 2 Tándem B
5	Barra Casa Máquinas
6	Barra Refinería
7	Barra Cachaza
8	Barra Calderas 4 - 5
9	Barra Torre Enfriamiento

Fuente: elaboración propia.

Expresar las reactancias en el sistema en por unidad refiriendo los valores a una unidad base, preferentemente de tensión y potencia.

Para llevar a cabo este paso, primero dividimos en zonas el diagrama unifilar de tal manera que podamos identificar los valores de unidad para cada zona.

En la figura 31 se muestra el diagrama unifilar del ingenio dividido por zonas según su nivel de tensión.

Figura 31. Diagramas unifilar 69 000 a 13 800 V en zonas



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII se muestran los valores base para las zonas descritas anteriormente.

Tabla VIII. Valores base por zona

Zona	Magnitud	Unidad de medida
1	50,000 0000	MVA
	69 000,000 000 0	V
	418,369 760 0	A
	95,220 000 0	Ω
2	50,000 000 0	MVA
	13 800,000 000 0	V
	2,091 848 8	A
	3,808 800 0	Ω
3	50,000 000 0	MVA
	2 400,000 000 0	V
	12,028 130 6	A
	0,115 200 0	Ω
4	50,000 000 0	MVA
	480,000 000 0	V
	60,140 653 0	A
	0,004 608 0	Ω
5	50,000 000 0	MVA
	4 800,000 000 0	V
	6,014 065 3	A
	0,460 800 0	Ω

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IX, X y XI se muestran los valores por unidad de reactancia de los equipos asociados al sistema.

Tabla IX. **Valores de reactancia de los transformadores, en pu**

Transformador	X (+) (-)	X(0)
T1	0,216 000 0	0,216 000 0
T2	0,107 318 2	0,107 318 2
T3	0,107 454 5	0,107 454 5
T4	0,093 600 0	0,093 600 0
T5	0,220 000 0	
T6	0,987 600 0	0,987 600 0
T7	1,182 000 0	1,182 000 0
T8	0,738 000 0	0,738 000 0
T9	0,126 250 0	0,126 250 0
T10	0,201 000 0	
T11	0,165 000 0	0,165 000 0
T12	0,198 000 0	
T13	0,687 600 0	0,687 600 0
T14	1,098 000 0	1,098 000 0
T15	1,220 000 0	1,220 000 0
T16	1,830 000 0	1,830 000 0
T17	1,180 000 0	1,180 000 0
T18	1,174 000 0	1,174 000 0
T19	0,738 000 0	0,738 000 0
T20	1,158 000 0	1,158 000 0
T21	1,100 000 0	1,100 000 0
T22	1,154 000 0	1,154 000 0

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Valores de reactancia de los generadores, en pu**

Generador	X (+) (-)	X(0)
G1	2,400 000 00	1,560 000 00
G2	0,432 000 00	0,144 000 00
G3	0,252 006 72	0,084 002 24
G4	0,090 000 00	0,030 000 00
G5	0,216 000 00	0,072 000 00
G6	0,345 158 20	0,218 600 19
G7	0,185 454 55	0,120 000 00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Valores de reactancia de los conductores, en pu**

Conductor	X (+) (-)	X(0)
L1	0,000 015 091 4	0,000 045 274 105
L2	0,000 038 431 0	0,000 115 293 000
L3	0,000 038 431 0	0,000 115 293 000
L4	0,000 038 431 0	0,000 115 293 000
L5	0,000 037 996 2	0,000 113 989 000
L6	0,004 009 074 0	0,012 027 221 000
L7	0,000 332 191 0	0,000 996 574 000
L8	0,000 585 131 0	0,001 755 392 000
L9	0,002 168 478 0	0,006 505 435 000
L10	0,002 021 424 0	0,006 064 272 000
L11	0,000 915 899 0	0,002 747 698 000
L12	0,000 288 595 0	0,000 865 784 000
L13	0,002 051 670 0	0,006 155 009 000
L14	0,000 172 653 0	0,000 517 958 000
L15	0,003 518 589 0	0,010 555 766 000
L16	0,000 345 306 0	0,001 035 917 000

Continuación de la tabla XI.

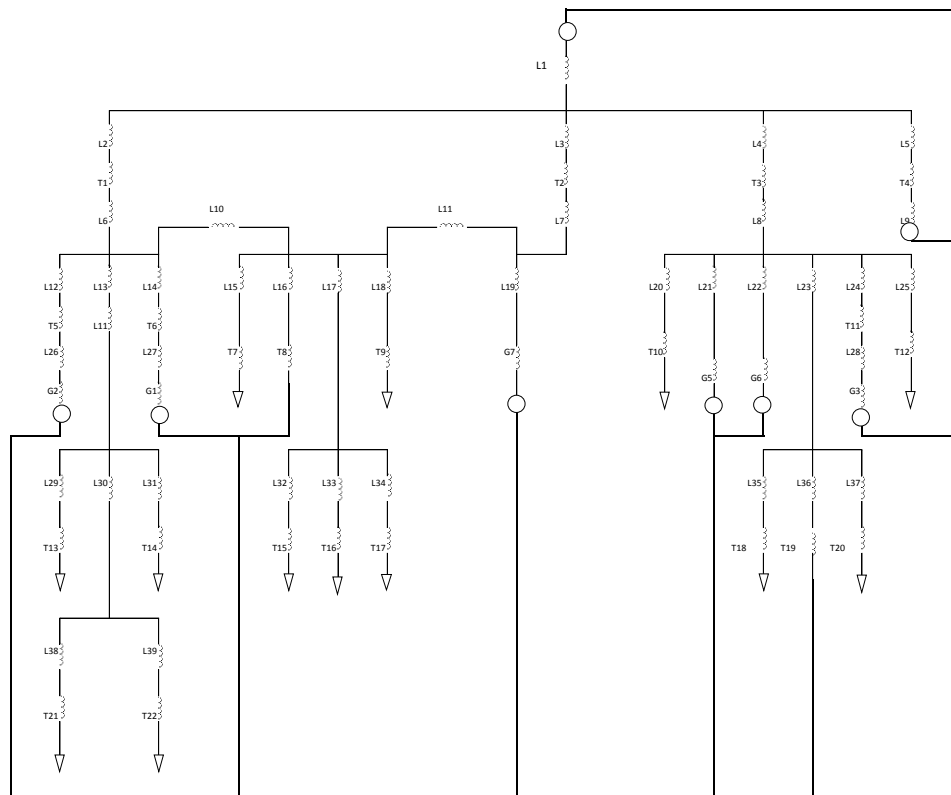
Conductor	X (+) (-)	X(0)
L17	0,002 751 523 0	0,008 254 570 0
L18	0,000 092 065 2	0,000 276 196 0
L19	0,004 128 663 0	0,012 385 988 0
L20	0,001 290 800 0	0,003 872 4010
L21	0,000 265 753 0	0,000 797 259 0
L22	0,000 444 820 0	0,001 334 461 0
L23	0,000 288 532 0	0,000 865 595 0
L24	0,000 128 132 0	0,000 384 395 0
L25	0,000 123 385 0	0,000 370 156 0
L26	0,002 764 167 0	0,008 292 500 0
L27	0,120 442 708 0	0,361 328 125 0
L28	0,001 448 958 0	0,004 346 875 0
L29	0,000 010 182 7	0,000 030 548 2
L30	0,010 149 968 0	0,030 449 905 0
L31	0,007 720 227 0	0,023 160 681 0
L32	0,000 380 592 0	0,001 141 777 0
L33	0,000 398 236 0	0,001 194 707 0
L34	0,003 982 357 0	0,011 947 070 0
L35	0,002 813 611 0	0,008 440 832 0
L36	0,000 683 050 0	0,002 049 149 0
L37	0,001 892 880 0	0,005 678 639 0
L38	0,000 621 298 0	0,001 863 894 0
L39	0,003 776 938 0	0,011 330 813 0

Fuente: elaboración propia.

- 4) Elaborar el diagrama de secuencia positiva del sistema eléctrico bajo estudio.

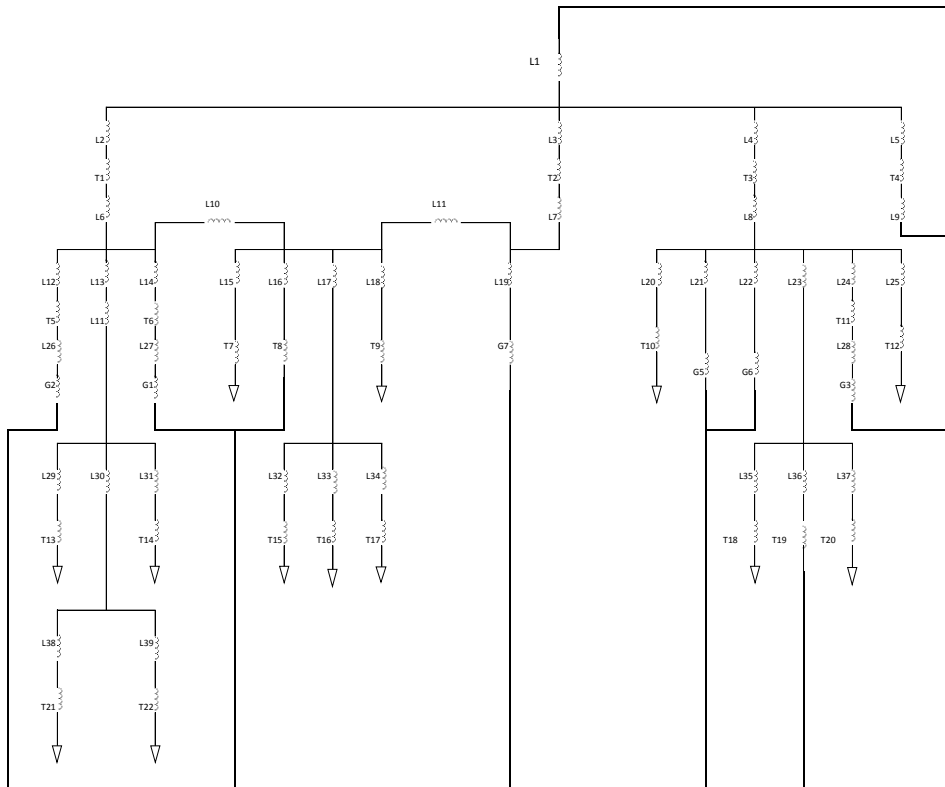
En las figuras 32, 33 y 34 se muestran los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente del ingenio.

Figura 32. **Diagramas de secuencia positiva del sistema**



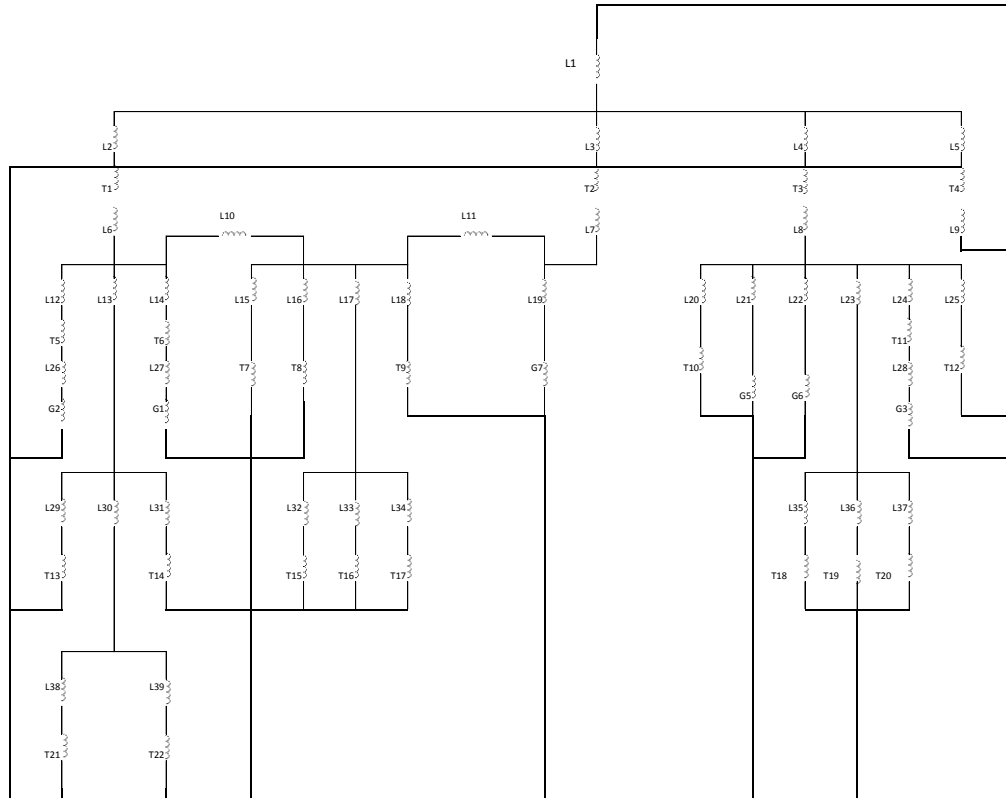
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Diagramas de secuencia negativa del sistema



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Diagramas de secuencia cero del sistema



Fuente: elaboración propia.

Reducir a una única impedancia equivalente por el método de equivalente de Thévenin a dos o más impedancias que se encuentren conectadas a un sólo lado de barra.

En la tabla XII se presentan los resultados de la reducción.

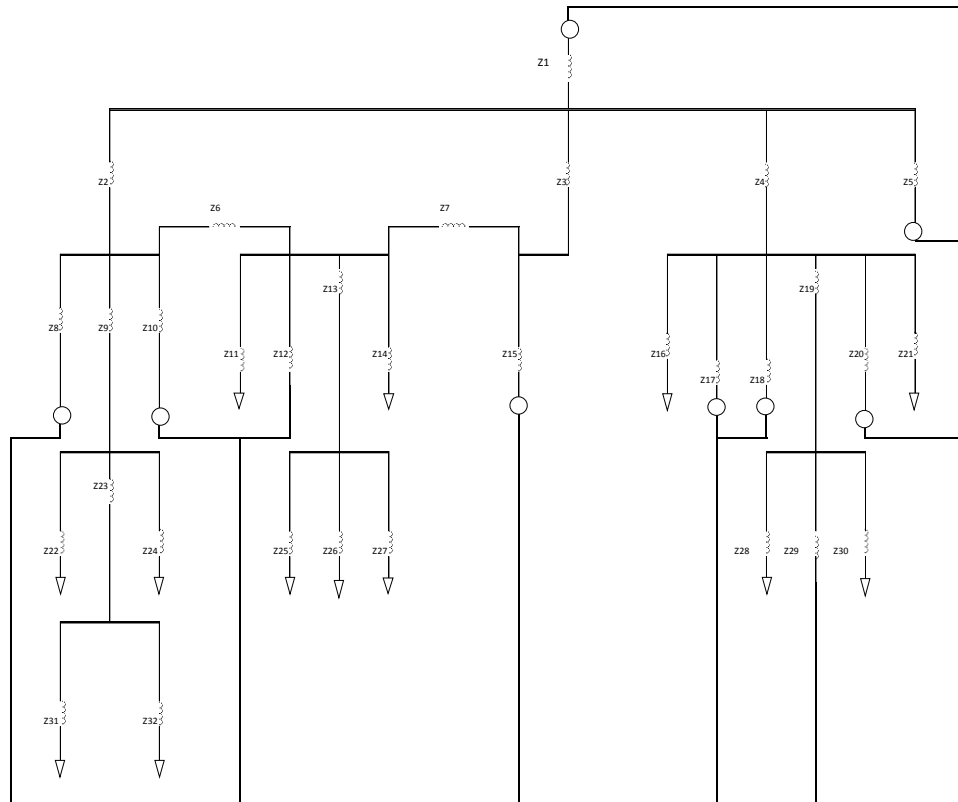
Tabla XII. **Valores de reactancia después de la reducción**

Reactancia	X (+) (-)	X(0)
Z1	0,000 015 091 4	0,000 045 27
Z2	0,220 047 505 0	0,228 142 50
Z3	0,107 688 804 0	0,108 430 00
Z4	0,108 078 107 0	0,109 325 20
Z5	0,185 806 474 0	0,130 219 40
Z6	0,002 021 424 0	0,006 064 30
Z7	0,000 915 899 0	0,002 747 70
Z8	0,313 052 761 0	0,039 158 30
Z9	0,002 051 670 0	0,006 155 00
Z10	3,508 215 361 0	2,909 446 10
Z11	1,185 518 589 0	1,192 555 80
Z12	0,738 345 306 0	0,739 035 90
Z13	0,002 751 523 0	0,008 254 60
Z14	0,126 342 065 0	0,126 526 20
Z15	0,189 583 208 0	0,132 386 00
Z16	0,202 290 800 0	0,003 872 40
Z17	0,216 265 753 0	0,072 797 30
Z18	0,345 603 018 0	0,219 934 70
Z19	0,000 288 532 0	0,000 865 60
Z20	0,418 583 810 0	0,253 733 50
Z21	0,198 123 385 0	0,000 370 20
Z22	0,687 610 183 0	0,687 630 50
Z23	0,010 149 968 0	0,030 449 91
Z24	1,105 720 227 0	1,121 160 68
Z25	1,220 380 592 0	1,221 141 78
Z26	1,830 398 236	1,831 194 71
Z27	1,183 982 357	1,191 947 07
Z28	1,176 813 611	1,182 440 83
Z29	0,738 683 050	0,740 049 15
Z30	1,159 892 880	1,163 678 64
Z31	1,100 621 298	1,101 863 89
Z32	1,157 776 938	1,165 330 81

Fuente: elaboración propia.

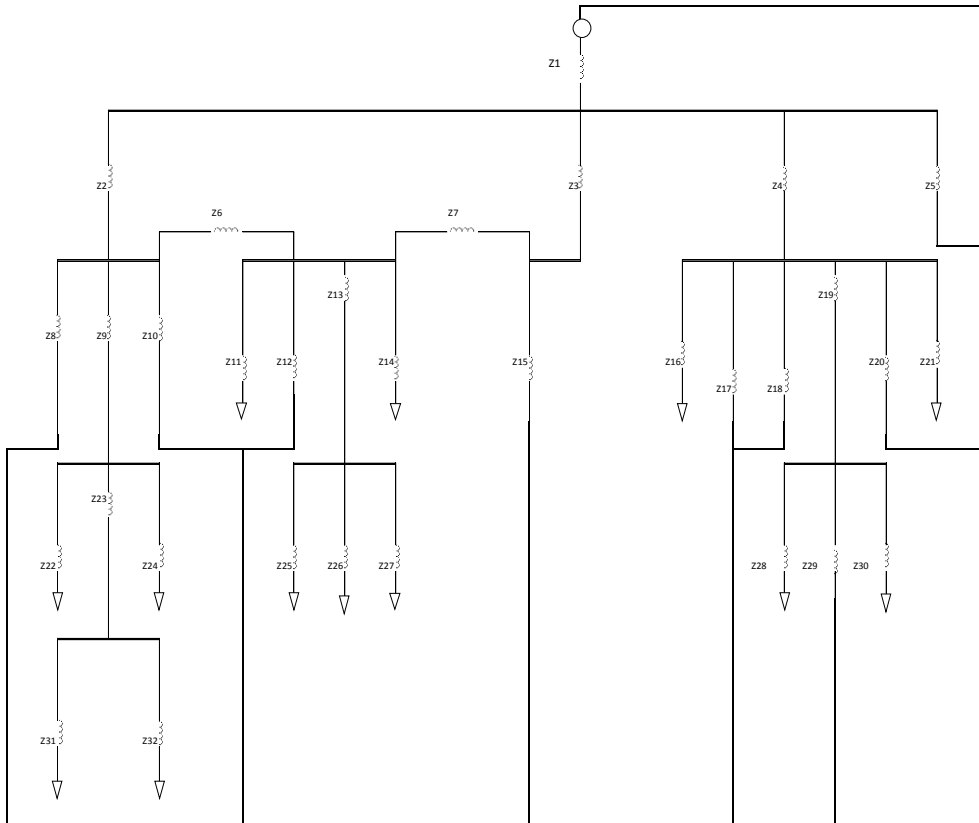
En las figuras 35, 36 y 37 se encuentran los diagramas de secuencias positiva, negativa y cero respectivamente, luego de la reducción de algunas impedancias en serie.

Figura 35. Diagramas de secuencia positiva del sistema después de la reducción



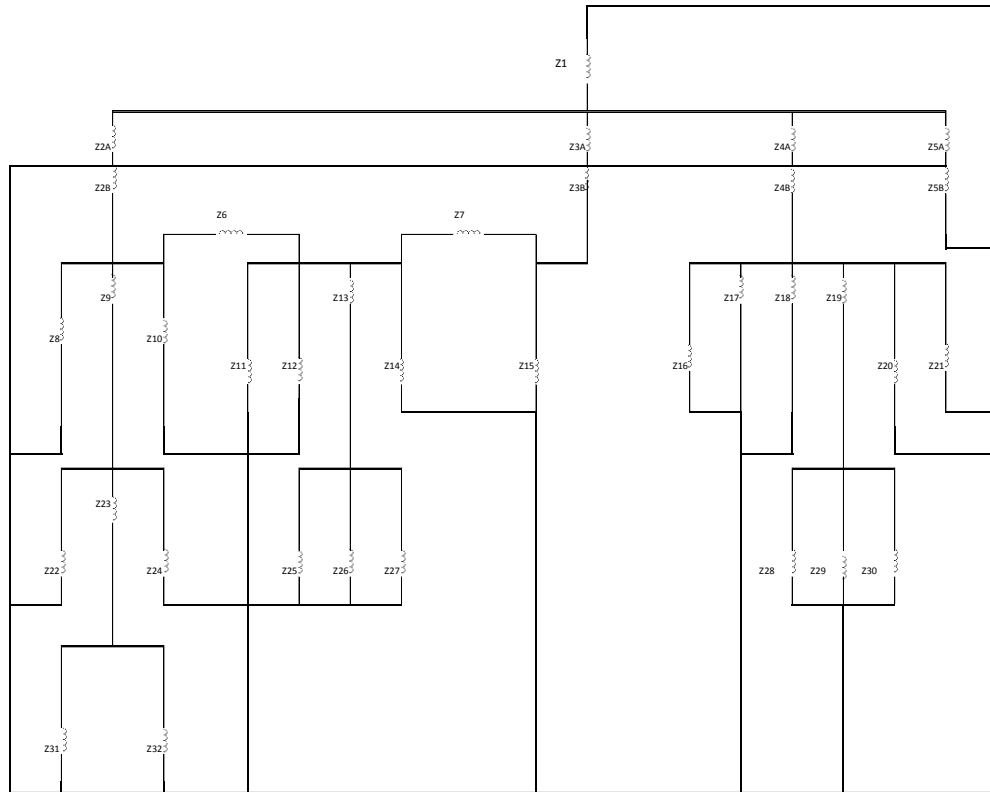
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Diagramas de secuencia negativa del sistema después de la reducción**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Diagramas de secuencia cero del sistema después de la reducción**



Fuente: elaboración propia.

Expresar los valores de reactancia en sus valores equivalentes de admitancia.

En la tabla XIII se muestran los valores de admitancia después de la reducción.

Tabla XIII. **Valores de admitancia, en pu**

Admitancia	X (+) (-)	X(0)
Y1	66 263,048 020 000	22 087,682 670 000
Y2	4,544 473 255	4,383 225 124
Y3	9,286 016 394	9,222 535 758
Y4	9,252 567 665	9,147 019 343
Y5	5,381 943 782	7,679 345 935
Y6	494,700 748 100	164,900 249 400
Y7	1 091,822 852 000	363,940 950 800
Y8	3,194 349 717	25,537 380 220
Y9	487,407 862 400	162,469 287 500
Y10	0,285 045 214	0,343 708 036
Y11	0,843 512 712	0,838 535 211
Y12	1,354 379 844	1,353 114 209
Y13	363,435 045 100	121,145 015 000
Y14	7,915 020 213	7,903 501 681
Y15	5,274 728 761	7,553 669 518
Y16	4,943 378 536	258,237 734 900
Y17	4,623 940 620	13,736 780 950
Y18	2,893 493 251	4,546 805 091
Y19	3 465,822 232 000	1 155,274 077 000
Y20	2,389 007 830	3,941 142 813
Y21	5,047 359 747	2 701,563 996 000
Y22	1,454 312 378	1,454 269 306
Y23	98,522 473 310	32,840 824 440
Y24	0,904 387 905	0,891 932 813
Y25	0,819 416 505	0,818 905 731
Y26	0,546 329 198	0,546 091 574
Y27	0,844 607 180	0,838 963 428
Y28	0,849 752 239	0,845 708 278
Y29	1,353 760 588	1,351 261 603
Y30	0,862 148 581	0,859 343 780
Y31	0,908 577 729	0,907 553 106
Y32	0,863 724 235	0,858 125 426

Fuente: elaboración propia.

Construir la matriz de admitancias, a partir del diagrama de secuencia positiva. En la tabla XIV, XV, XVI y XVII se muestran la matriz de impedancia de secuencia positiva, negativa y cero del sistema.

Tabla XIV. **Matriz de admitancias de secuencia positiva y negativa, en pu parte A**

Matriz de Admitancias de secuencia positiva y negativa del sistema					
Filas / Columnas	1	2	3	4	5
1	66 291,513 020 000	4,544 473 255	0	9,286 016 394	9,252 567 665
2	4,544 473 255	990,132 478 700	494,700 748 1	0	0
3	0	494,700 748 100	1 951,313 025 0	1 091,822 852 000	0
4	9,286 016 394	0	1 091,822 852 0	1 106,383 597 000	0
5	9,252 567 665	0	0	0	3 484,981 241 000
6	0	487,407 862 400	0	0	0
7	0	0	363,435 045 1	0	0
8	0	0	0	0	3 465,822 232 000
9	0	0	0	0	0

Tabla XV. **Matriz de admitancias de secuencia positiva y negativa, en pu parte B**

Matriz de Admitancias secuencia positiva y negativa del sistema				
Filas / Columnas	6	7	8	9
1	0	0	0	0
2	487,407 862 40	0	0	0
3	0	363,435 045 1	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	3 465,822 232	0
6	585,930 335 70	0	0	98,522 473 31
7	0	363,435 045 1	0	0
8	0	0	3 467,175 993	0
9	98,522 473 31	0	0	98,522 473 31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Matriz de admitancias de secuencia cero, en pu parte A**

Matriz de Admitancias de secuencia cero del sistema					
Fila / Columnas	1	2	3	4	5
1	22 121,584 97	0	0	0	0
2	0	353,250 625 1	164,900 249 4	0	0
3	0	164,900 249 4	660,081 366 3	363,940 950 8	0
4	0	0	363,940 950 8	371,494 620 3	0
5	0	0	0	0	4 137,300 537
6	0	162,469 287 5	0	0	0
7	0	0	121,14 501 5	0	0
8	0	0	0	0	1 155,274 077
9	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Matriz de admitancias de secuencia cero, en pu parte B**

Matriz de Admitancias de secuencia cero del sistema				
Filas / Columnas	6	7	8	9
1	0	0	0	0
2	162,469 287 50	0	0	0
3	0	121,145 015 0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	1 155,274 077	0
6	197,656 314 00	0	0	32,840 824 44
7	0	123,348 975 8	0	0
8	0	0	1 183,022 063	0
9	32,840 824 44	0	0	34,606 502 97

Fuente: elaboración propia.

Invertir la matriz de admitancias, empleando cualquier modelo matemático.

En las tablas XVIII, XIX, XX y XXI se muestran los resultados de la matriz invertida de secuencia positiva, negativa y cero del sistema, por medio de una hoja de cálculo.

Tabla XVIII. **Matriz invertida de secuencia positiva y negativa, en parte A**

Matriz invertida secuencia positiva y negativa del sistema					
Filas / Columnas	1	2	3	4	5
1	0,000 015 087 70	-0,000 008 707 68	0,000 008 710 31	-0,000 008 722 31	-0,000 068 056 70
2	-0,000 008 707 68	0,042 991 732 00	-0,041 667 539 00	0,041 119 239 00	0,000 039 278 20
3	0,000 008 103 10	-0,041 667 539 00	0,042 343 291 00	-0,041 786 098 00	-0,000 003 929 01
4	-0,000 008 722 31	0,041 119 239 00	-0,041 786 098 00	0,042 140 084 00	0,000 003 934 42
5	-0,000 006 805 67	0,000 003 927 82	-0,000 003 929 01	0,000 039 344 20	0,048 754 446 00
6	0,000 008 707 68	-0,042 991 732 00	0,041 667 539 00	-0,041 119 239 00	-0,000 003 927 82
7	-0,000 008 710 31	0,041 667 539 00	-0,042 343 291 00	0,041 786 098 00	0,000 003 929 01
8	0,000 006 803 01	-0,000 093 926 29	0,000 003 927 47	-0,000 003 932 88	-0,048 735 410 00
9	-0,000 008 707 68	0,042 991 732 00	-0,041 667 539 00	0,041 119 239 00	0,000 003 927 82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Matriz invertida de secuencia positiva y negativa, en parte B**

Matriz invertida secuencia cero del sistema				
Filas / Columnas	6	7	8	9
1	0,000 008 707 68	-0,000 008 710 31	0,000 006 803 01	-0,000 008 707 68
2	-0,042 991 732 00	0,041 667 539 00	-0,000 003 926 29	0,042 991 732 00
3	0,041 667 539 00	-0,042 343 291 00	0,000 003 927 47	-0,041 667 539 00
4	-0,041 119 239 00	0,041 786 098 00	-0,000 003 932 88	0,041 119 239 00
5	-0,000 003 927 82	0,000 003 929 01	-0,048 735 410 00	0,000 003 927 82
6	0,045 043 402 00	-0,041 667 539 00	0,000 003 926 29	-0,045 043 402 00
7	-0,041 667 539 00	0,045 094 815 00	-0,000 003 927 47	0,041 667 539 00
8	0,000 003 926 29	-0,000 003 927 47	0,049 004 800 00	-0,000 003 926 29
9	-0,045 043 402 00	0,041 667 539 00	-0,000 003 926 29	0,055 193 371 00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Matriz invertida de secuencia cero, en pu parte A**

		Matriz invertida de secuencia cero del sistema				
Filas / columnas	1	2	3	4	5	
1	6 6291,513 020 000	4,544 473 255	-3,764 800E-13	9,286 0163 940	9,252 567 665	
2	4,544 473 255	990,132 478 700	494,700 748 100	-6,611 330E12	-1,484 25E-15	
3	-2,794 16E-14	494,700 748 100	1 951,313 025 000	1 091,822 852 000	-2,527 18E-15	
4	9,286 016 394	-5,780 79E-12	1 091,822 852 000	1 106,383 597 000	-4,725 93E-19	
5	9,252 567 665	-1,876 69E-17	4,663 16E-15	3,222 95E-15	3 484,981 241 000	
6	-2,505 69E-14	487,407 862 400	-3,926 92E-12	-2,985 50E-12	2,908 28E-16	
7	2,341 78E-14	-2,458 33E-12	363,435 045100	2,790 12E-12	-1,066 92E-15	
8	9,213 27E-32	2,425 67E-17	4,663 18E-15	3,205 23E-15	3 465,822 232 000	
9	6,349 04E-15	-2,187 64E-14	9,948 68E-13	7,563 65E-13	2,908 28E-16	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Matriz invertida de secuencia cero, en pu parte B**

		Matriz invertida de secuencia cero del sistema			
Filas / Columnas	6	7	8	9	
1	6,467 42E-14	-3,258 02E-16	-2,297 86E-13	0	
2	487,407 862 400	-1,198 90E-12	-1,475 81E-15	0	
3	-7,828 64E-12	363,435 045 100	-2,519 62E-15	0	
4	-3,692 62E-12	2,790 12E-12	3,339 30E-20	0	
5	-1,456 19E-15	1,179 20E-29	3 465,822 232 000	-1,598 85E-18	
6	585,930 335 700	-9,807 06E-13	2,892 29E-16	98,522 473 310	
7	-2,458 33E-12	363,435 045100	-1,067 34E-15	-3,477 80E-38	
8	-1,429 64E-15	1,168 89E-29	3 467,175 993 000	1,129 74E-19	
9	98,522 473 310	2,484 58E-13	2,892 29E-16	98,522 473 310	

Fuente: elaboración propia.

Con el valor obtenido de impedancia equivalente en el punto de falla, calcular los valores de corriente y potencia de cortocircuito.

En la tabla XXII se muestra el equivalente de Thévenin de secuencia positiva, negativa y cero de las impedancias del sistema correspondiente a las 9 barras del sistema.

Tabla XXII. **Equivalente de Thévenin en las barras, en pu**

Barra	Secuencia +	Secuencia -	Secuencia 0
1	0,000 015 087 7	0,000 015 087 7	6 6291,513 020 00
2	0,042 991 732 0	0,042 991 732 0	990,132 478 70
3	0,042 343 291 0	0,042 343 291 0	1 951,313 025 00
4	0,042 140 084 0	0,042 140 084 0	1 106,383 597 00
5	0,048 754 446 0	0,048 754 446 0	3 484,981 241 00
6	0,045 043 402 0	0,045 043 402 0	585,930 335 70
7	0,045 094 815 0	0,045 094 815 0	363,435 045 10
8	0,049 004 800 0	0,049 004 800 0	3 467,175 993 00
9	0,055 193 371 0	0,055 193 371 0	98,522 473 31

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIX se muestra la corriente de corto circuito trifásica y monofásica del sistema correspondiente a cada barra del sistema. Así como la potencia de corto circuito trifásica y monofásica del sistema correspondiente a cada barra.

Tabla XXIII. **Valores de corriente y potencia de cortocircuito por barra**

Barra	Corriente de corto circuito		Potencia de corto circuito	
	Trifásico (A)	Monofásico (A)	Trifásico (VA)	Monofásico (VA)
1	4 448,30	5 305,07	920 798,96	1 473 278,34
2	20 314,72	26 025,87	841 029,25	1 345 646,80
3	20 526,37	26 046,33	849 791,69	1 359 666,70
4	20 577,31	25 780,15	851 900,56	1 363 040,89
5	20 837,46	31 170,20	862 670,78	1 380 273,25
6	19 661,80	24 485,41	813 998,37	1 302 397,39
7	19 642,48	23 924,45	813 198,49	1 301 117,59
8	20 754,28	30 835,13	859 227,33	1 374 763,72
9	3 392,88	18 791,08	140 465,23	224 744,36

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los resultados obtenidos son incluyendo el sistema hasta 13.8kV, por lo que en este cálculo no se han incluido motores debido a que el nivel de tensión en que estos trabajan están por debajo de este nivel de tensión. El incluir los motores provocaría cambios en los resultados.

4. CÁLCULO DE AJUSTES DE PROTECCIONES EN EL INGENIO

La función principal de un sistema de protección es remover rápidamente el servicio cuando alguno o varios elementos del sistema de potencia sufre un cortocircuito o cuando opera de manera anormal. Así como una indicación para localizar más rápidamente la falla.

4.1. Dispositivos de protección eléctrica

Existen variedad de dispositivos eléctricos y electrónicos los cuales tienen la función de detectar cualquier falla y proteger a uno o varios equipos.

A continuación se da un breve concepto de los principales dispositivos utilizados en las protecciones.

4.1.1. Transformadores de medida

Son dispositivos que permiten obtener información del sistema, con el propósito de hacer mediciones, estos transformadores son.

a) El transformador de potencial (PT)

Posee devanados especiales, el primario para alta tensión y el secundario para baja tensión. Su potencia nominal es muy baja, porque su único propósito es dar una muestra del voltaje, los mismos deben contar con cierto nivel de exactitud dependiendo de qué tan exigente sea la aplicación.

b) El transformador de corriente (CT)

Toman una muestra de corriente en la línea y la reducen a un nivel medible y seguro. Este transformador puede suministrar valores muy exactos de la corriente que mide. En todo momento debe permanecer cortocircuitado el lado secundario del transformador de corriente para evitar que aparezcan altos voltajes al retirar su conexión para una inspección.⁵⁰

4.1.2. Relés

Son dispositivos que censan cualquier cambio en la señal que está recibiendo, usualmente desde una fuente de voltaje o corriente, son capaces de discriminar condiciones normales y anormales de operación, abre y cierra contactos para iniciar alguna operación cuando la señal de entrada está fuera de los límites preestablecidos.

Existen una amplia variedad de relés de protección, pero en esta ocasión lo dividiremos en dos clases que son:

4.1.2.1. Relés convencionales

“Son los relés electromecánicos contruidos por componentes eléctricos, magnéticos y mecánicos, tienen una bobina de operación y varios contactos, son muy robustos y confiables”.⁵¹

4.1.2.2. Relés computarizados

Son relés compuestos de subsistemas con funciones bien definidas, entre estos subsistemas los más importantes son:

- a) El microprocesador que tiene la función de almacenar información.

⁵⁰ CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. p. 141-142.

⁵¹ *Ibíd.* p. 88.

b) El módulo de entrada que se utiliza para capturar señales analógicas para enviarlas al microprocesador.

c) Los módulos de comunicación que son puertos serie y paralelo para permitir la interconexión entre los sistemas asociados.

Los relés computarizados son tecnológicamente superiores a los convencionales pues tienen las ventajas siguientes.

- a) Confiabilidad
- b) Autodiagnóstico
- c) Registro de eventos
- d) Integración de sistemas digitales
- e) Protección adaptable⁵²

4.1.3. Interruptor de potencia

Este dispositivo tiene la función de abrir o cerrar un circuito en tensión, interrumpiendo o permitiendo la circulación de corriente. Su apertura direccionada por relés de protección permite aislar la zona en que se ha producido una falla.

Un interruptor de potencia consta principalmente de los siguientes elementos:

- Bobinas de cierre y apertura que reciben la señal del relé.
- Contactos principales para la apertura o cierre del interruptor.
- Contactos auxiliares para indicar el estado del interruptor.
- Cámara de extinción del arco, con un ambiente de alta rigidez para extinguir rápidamente el arco producido por el cierre o apertura del interruptor, por medio de SF₆, aceite, vacío, entre otros.

⁵² CASTAÑO, Samuel. *Protecciones Eléctricas*. p.107-109.

4.2. Datos recopilados para el ajuste de protecciones en Ingenio La Unión

Datos recopilados para el ajuste de protección en el Ingenio: A continuación se muestra las relaciones de los transformadores de medición, los relés de protección existentes y las protecciones habilitadas en esos relés.

4.2.1. Transformadores de medida

En la tabla XXIV se muestra la relación de los transformadores de corriente y transformadores de potencial asociados a los interruptores.

Tabla XXIV. **Relación de transformadores de medición utilizados en el Ingenio**

Interruptor	Relación CT	Relación PT
I1	400:5	69000:115
I2	300:5	72000:120
I3	300:5	72000:120
I4	200:5	72000:120
I5	300:5 y 1500:5	8400:120
I6	800:5	13800:120
I7	600:5	13800:120
I8	No tiene CT	No tiene PT
I9	No tiene CT	No tiene PT
I10	1500:5	14400:120
I11	1500:5	14400:120
I12	800:5	13800:120
I13	300:5 y 2000:5	13800:120
I14	200:5	13800:120
I15	200:5 y 1500:5	480:120
I16	300:5	13800:120
I17	100:5	13800:120
I18	150:5	13800:120
I19	600:5	13800:120
I20	1500:5	14400:120
I21	600:5 y 3000:5	13800:120
I22	600:5	13800:120
I23	1200:5	13800:120
I24	200:5	13800:120
I25	600:5 y 2000:5	4800:5

Continuación de la tabla XXIV.

I26	600:5	13800:120
I27	No tiene CT	No tiene PT
I28	No tiene CT	No tiene PT
I29	No tiene CT	No tiene PT
I30	No tiene CT	No tiene PT
I31	No tiene CT	No tiene PT
I32	No tiene CT	No tiene PT
I33	No tiene CT	No tiene PT
I34	No tiene CT	No tiene PT
I35	No tiene CT	No tiene PT
I36	No tiene CT	No tiene PT
I37	No tiene CT	No tiene PT

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los interruptores I8 e I9 no tienen Ct's ni Pt's porque tienen disparo transferido, I8 se abre al hacerlo I7, I9 se abre al hacerlo I10. Los interruptores de I27 a I37 no tienen Ct's ni Pt's porque utilizan fusibles para la protección.

4.2.2. Relés de protección

En la tabla XXV, se muestran los relevadores asociados a los interruptores.

Tabla XXV. **Relés de protección utilizados en el Ingenio**

Interruptor	Marca	Modelo
I1	SEL	SEL-311B
I2	GE	Multilin 745
I3	GE	Multilin 745
I4	GE	Multilin 745
I5	GE	Multilin 745
I5	GE	Multilin 489
I6	GE	Multilin 745
I7	GE	Multilin 745
I8		No tiene relé
I9		No tiene relé
I10	GE	Multilin 750

Continuación de la tabla XXV.

I11	GE	Multilin 745
I12	GE	Multilin 745
I13	GE	Multilin 745
I13	GE	Multilin 489
I14	GE	Multilin 750
I15	GE	Multilin 745
I15	GE	Multilin 489
I16	GE	Multilin 750
I17	GE	Multilin 750
I18	GE	Multilin 750
I19	GE	Multilin 745
I20	GE	Multilin 489
I21	GE	Multilin 745
I22	GE	Multilin 489
I23	GE	Multilin 489
I24	GE	Multilin 750
I25	GE	Multilin 745
I25	GE	Multilin 489
I26	GE	Multilin 745
I27		No tiene relé
I28		No tiene relé
I29		No tiene relé
I30		No tiene relé
I31		No tiene relé
I32		No tiene relé
I33		No tiene relé
I34		No tiene relé
I35		No tiene relé
I36		No tiene relé
I37		No tiene relé

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los interruptores I8 e I9 no tienen relés porque tienen disparo transferido, I8 se abre al hacerlo I7, I9 se abre al hacerlo I10. Los interruptores de I27 a I37 no tienen relés porque utilizan fusibles para la protección.

En las tabla anteriores XXV se presentan 4 modelos de relevadores de protección, por lo que se procederá a dar una breve explicación de cada uno.

4.2.2.1. Relé multilin 745

Es un relé de alta velocidad, basado en multiprocesador, trifásico, dos o tres devanados, planeado para la protección primaria y la administración de los transformadores de energía, pequeños, medios y grandes.

Combina diferenciales de porcentaje la sobre corriente, frecuencia y sobre excitación junto con la monitorización de armónicos individuales, y el THD (Distorsión armónica total).⁵³

En la figura 38 se muestra una fotografía de cómo luce físicamente un relé multilin 745.

4.2.2.2. Relé multilin 750

El relé 750 es una unidad basada en microprocesadores destinados a la gestión y protección de los alimentadores de distribución primaria, así como para la gestión y protección de respaldo de las barras, transformadores y líneas de transmisión.

Cada relé suministra funciones de protección, control, así como monitoreo local y remoto para interfaz con personas.⁵⁴

En la figura 39 se muestra una fotografía de cómo luce físicamente un relé multilin 750.

4.2.2.3. Relé multilin 489

“El relé 489 proporciona funciones de protección, medida y monitorización de generador. Puede ser utilizado como protección principal o protección de respaldo en generadores síncronos de inducción”.⁵⁵

⁵³ GENERAL ELECTRIC 745 *Transformer Protection System Relay*. p. 2-13.

⁵⁴ GENERAL ELECTRIC. 750/760 *Feeder Management Relay*. p. 2-1.

⁵⁵ GENERAL ELECTRIC. 489, *Generator Management Relay*. p.1.

En la figura 40 se muestra una fotografía de cómo luce físicamente un relé multilin 489.

4.2.2.4. Relé SEL-311B

El sistema de protección y automatización SEL-311B es un relé de tres polos, con función de disparo y recierre, aplicado para protección de líneas de transmisión.

Posee una colección potente de elementos de protección de fase y tierra con cuatro recierres proveyendo al usuario información de la distancia a la cual ocurrió la falla. Reportes de eventos, grabación de secuencia de eventos, entre otros.⁵⁶

En la figura 41 se muestra una fotografía de cómo luce físicamente un relé SEL-311B.

Figura 38. Relevador multilin 745



Fuente: 745 Transformer Protection System instruction Manual. p.1.

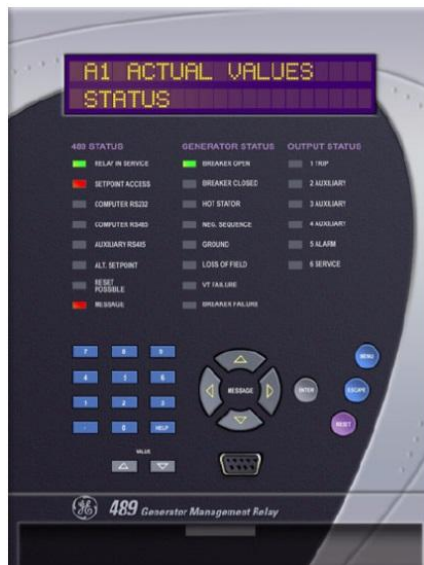
⁵⁶ SEL 311-B. Protection and Automation System.

Figura 39. **Relevador multilin 750**



Fuente: 750/760 Feeder Management Relay Instruction Manual. p. 1.

Figura 40. **Relevador multilin 489**



Fuente: 489 Generator Management Relay Instruction Manual. p.1.

Figura 41. Relevador SEL 311-B



Fuente: SEL-311B *Protection and Automation System*. p. 1.

4.2.3. Protecciones habilitadas en relés del Ingenio

A continuación se presentan las protecciones que están habilitadas en cada relé y se da una breve explicación de las más relevantes.

Las tablas XXVI, XXVII y XXVIII muestra las protecciones habilitadas (X) y no habilitadas (0) en los relés 489, de los generadores instalados en el Ingenio.

Tabla XXVI. **Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte A**

Interruptor	Corriente								
	Alarma de sobre corriente	Sobre corriente Fuera de línea	Energización accidental	Sobre corriente en fase	Secuencia negativa	Sobre corriente a tierra	Diferencial de fase	Direccional de tierra	Alto nivel de sobre corriente en fase
I5	0	X	0	X	X	0	X	0	X
I13	0	0	0	X	X	0	X	0	X
I15	0	0	0	X	0	X	X	0	X
I20	0	0	X	X	X	X	X	0	0
I22	0	0	0	X	X	0	X	0	X
I23	0	0	0	X	X	X	X	0	X
I25	0	0	0	X	0	0	X	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte B**

Interruptor	Voltaje									
	Sobre voltaje	Bajo voltaje	Relación voltaje / frecuencia	Cambio de fase	Baja frecuencia	Sobre frecuencia	Sobre voltaje en neutral	Bajo voltaje en neutral	Pérdida de excitación	Distancia
I5	X	X	X	0	X	X	X	0	X	0
I13	X	X	X	0	X	X	X	0	X	0
I15	X	X	X	0	X	X	0	0	X	0
I20	X	X	X	0	X	X	0	0	X	0
I22	0	0	0	0	X	X	0	0	X	0
I23	0	0	0	0	X	X	0	0	X	0
I25	0	X	0	0	X	0	0	0	X	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Estatus de protecciones de relés 489 utilizados en el Ingenio parte C**

Interruptor	Potencia		
	Potencia reactiva	Potencia inversa	Baja potencia
I5	X	X	0
I13	X	X	0
I15	0	X	0
I20	0	X	0
I22	0	X	0
I23	0	X	0
I25	0	X	0

Fuente: elaboración propia.

Las tablas XXIX, XXX XXXI y XXXII muestran las protecciones habilitadas (X) y no habilitadas (0) en los relés 745, de los transformadores instalados en el Ingenio.

Tabla XXIX. **Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte A**

Interruptor	Diferencial						Sobre corriente de fase		
	Porcentaje diferencial	inhibición de armónicas	inhibición de la energización	captación de la energización	inhibición de la quinta armónica	Diferencial instantáneo	Sobre corriente del tiempo del devanado	Sobre corriente 1 instantánea del devanado	Sobre corriente 2 instantánea del devanado
I2	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I3	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I4	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I5	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I6	X	X	X	X	X	X	X	X	X
I7	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I13	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I15	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I19	X	X	X	X	X	0	X	X	X
I21	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I25	X	X	X	X	0	X	X	X	X
I26	X	X	X	X	0	X	X	X	X

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte B**

Interruptor	Sobre corriente del neutro		Sobre corriente de tierra		Diferencial de tierra	Sobre corriente de secuencia negativa		
	Sobre corriente de tiempo de neutro del devanado 1(2/3)	Sobre corriente 1 instantánea del neutro del devanado 1(2/3)	Sobre corriente de tiempo de tierra del devanado 1(2/3)	Sobre corriente 1 instantánea de tierra del devanado 1(2/3)	Falla a tierra restringida del devanado 1(2/3)	Sobre corriente de tiempo de secuencia negativa del devanado 1	Sobre corriente 1 instantánea de secuencia negativa del devanado 1	
I2	X	X	X	0	0	0	0	0
I3	X	X	X	X	0	0	0	0
I4	X	X	X	0	0	0	0	0
I5	X	X	X	0	0	0	0	0
I6	X	X	X	0	0	0	0	0
I7	X	X	X	0	0	0	0	0
I11	-	-	-	-	-	-	-	-
I12	-	-	-	-	-	-	-	-
I13	X	X	X	0	0	0	0	0
I15	X	X	X	0	0	0	0	0
I19	X	X	X	0	0	0	0	0
I21	X	X	X	0	0	0	0	0
I25	X	X	X	0	0	0	0	0
I26	X	X	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte C**

Interruptor	Frecuencia			Sobre-excitación		Armónicas	
	Sub frecuencia 1(2)	Caída de frecuencia	Sobre frecuencia	Nivel de la quinta armónica	Voltios por Hertz 1(2)	Nivel de THD del devanado 1(2/3)	Disminución del valor nominal armónico del devanado 1(2/3)
I2	0	0	0	0	0	0	0
I3	X	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0
I7	X	X	X	0	0	0	0
I11	-	-	-	-	-	-	-
I12	-	-	-	-	-	-	-
I13	0	0	0	0	0	0	0
I15	0	0	0	0	0	0	0
I19	X	0	0	0	0	0	0
I21	0	0	0	0	0	0	0
I25	0	0	0	0	0	0	0
I26	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Estatus de protecciones de relés 745 utilizados en el Ingenio parte D**

Interruptor	Envejecimiento del aislamiento			Demanda de corriente	Sobrecarga	Cambiador derivaciones
	Límite del punto más caliente	Límite de factor de envejecimiento	Límite de pérdida de vida	Demanda de corriente	Sobrecarga del transformador	Falla del cambiador de derivaciones
I2	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	X
I4	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0
I11	-	-	-	-	-	-
I12	-	-	-	-	-	-
I13	0	0	0	0	0	0
I15	0	0	0	0	0	0
I19	0	0	0	0	X	0
I21	0	0	0	0	0	0
I25	0	0	0	0	0	0
I26	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Nota: En el caso de los interruptores I11 e I12 son accionados cuando se activan los relés I3 e I4 respectivamente.

Las tablas XXXIII, XXXIV y XXXV muestra las protecciones habilitadas (X) y no habilitadas (0) en los relés 750, de las cargas instaladas en el Ingenio.

Tabla XXXIII. Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte A

Interruptor	Sobre corriente de fase			Sobre corriente del neutral			Sobre corriente de tierra		
	Sobre corriente de tiempo	Sobre corriente instantánea	Sobre corriente direccional	Sobre corriente de tiempo	Sobre corriente instantánea	Sobre corriente direccional	Sobre corriente de tiempo	Sobre corriente instantánea	Sobre corriente direccional
I10	X	X	0	0	0	0	0	0	0
I14	X	X	0	0	0	0	X	0	0
I16	X	X	0	0	0	0	0	0	0
I17	X	X	0	0	0	0	0	0	0
I18	X	X	0	0	0	0	0	0	0
I24	X	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte B

Interruptor	Sobre corriente sensitiva a tierra				Secuencia negativa			Voltaje de secuencia negativa
	Sobre corriente de tiempo sensitiva a tierra	Sobre corriente instantánea sensitiva a tierra	Sobre corriente direccional sensitiva a tierra	Sobre corriente restricción de falla a tierra	Sobre corriente de tiempo de secuencia negativa	Sobre corriente instantánea de secuencia negativa	Sobre corriente direccional de secuencia negativa	
I10	0	0	0	0	0	0	0	0
I14	0	0	0	0	0	0	0	0
I16	0	0	0	0	0	0	0	0
I17	0	0	0	0	0	0	0	0
I18	0	0	0	0	0	0	0	0
I24	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Estatus de protecciones de relés 750 utilizados en el Ingenio parte C**

Interruptor	Voltaje				Frecuencia		Falla de interruptor	Potencia inversa
	Bajo voltaje en barra 1(2)	Bajo voltaje en la línea 3(4)	Sobre voltaje 1(2)	Desplazamiento del neutral	Sobre frecuencia 1(2)	Caída de frecuencia	Falla de interruptor	Potencia inversa
I10	X	0	0	0	0	0	0	0
I14	0	0	0	0	0	0	0	0
I16	0	0	0	0	0	0	0	0
I17	0	0	0	0	0	0	0	0
I18	X	0	0	0	0	0	0	0
I24	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXVI muestra las protecciones habilitadas (X) y no habilitadas (0) en el relé 311B, de la línea de alimentación instalada en el Ingenio.

Tabla XXXVI. **Estatus de protecciones del relé 311B utilizado en el Ingenio**

Interruptor	I1	Estado
MODELO	SEL 311B	
Impedancia	Distancia	
Sobre corriente	Sobre corriente instantánea	0
	Sobre corriente temporizada	X
	Sobre corriente direccional	X
Interruptor	Cierre bajo falla	X
Secuencia	Elemento direccional	X
Voltaje	Sobre voltaje	0
	Bajo voltaje	0
Recloser	Auto reenganche	0
Chequeo sincronismo	Chequeo de sincronismo	0

Fuente: elaboración propia.

4.3. Protecciones más relevantes

Existen muchas protecciones para los sistemas eléctricos, y se deben utilizar las más convenientes en cada sistema, pues no es conveniente el utilizarlas todas, se da una breve explicación de las más relevantes.

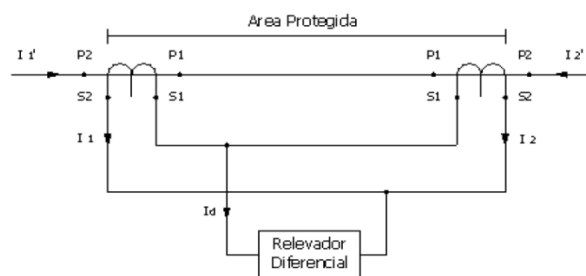
4.3.1. Protecciones diferencial

Es una de las protecciones más importantes en los sistemas eléctricos de potencia.

La protección diferencial se basa en una comparación de corriente, el hecho de que un equipo en operación normal tendrá el mismo valor de corriente en ambos lados es el principio de operación de esta protección, de manera que al ocurrir una falla en dicho equipo habrá una diferencia de corriente entre ambos lados. El cual puede ser detectado por los transformadores de corriente, y el relé de protección mandará a abrir el interruptor asociado a la carga.

En la figura 42 se muestra el esquema de una protección diferencial.

Figura 42. Esquema protección diferencial



Fuente: RAMÍREZ CASTAÑO, Samuel. *Protección de sistemas eléctricos*. p. 75.

4.3.2. Protecciones sobre corriente

El relé mide la corriente en cada fase en todo momento con la finalidad de detectar las sobre corrientes.

El tiempo en que actúa esta protección puede ser de tiempo definida al alcanzar cierto valor preestablecido de corriente. En este caso su operación puede ser instantánea o temporizada.

También puede ser de tiempo inverso, cuya operación depende del tiempo de según una curva exponencial.

4.3.3. Protecciones sobre corriente direccional

La protección de sobre corriente direccional es similar a la protección de corriente no direccional, pero incluye la dirección de flujo de corriente para la cual deseamos que actúe la protección.

4.3.4. Protección corriente de secuencia negativa

La presencia de corrientes de secuencia negativa es una indicación de desbalance eléctrico debido a una asimetría mecánica en el eje del generador, lo cual es provocado por una carga conectada no balanceada al mismo.

La presencia de corrientes de secuencia negativa es una indicación de desbalance eléctrico debido a una asimetría mecánica en el eje del generador, lo cual es provocado por una carga conectada no balanceada al mismo.

4.3.5. Protección de voltaje

Esta protección mide constantemente el valor de voltaje con la finalidad de detectar tensiones mayores o menores que el rango normal de operación. El relé detectará por lo tanto una tensión de sobretensión o subtensión.

La operación de esta protección puede ser también de tiempo definido o tiempo inverso.

4.3.6. Protección de relación tensión/frecuencia

La relación tensión/frecuencia en una máquina es un indicador del flujo magnético, se utiliza para evitar la saturación en el núcleo magnético.

4.3.7. Protección falla del interruptor

Consiste en un sistema de control para prevenir la falla en la apertura de un circuito en la potencia cuando se ha dado la orden de apertura.

Esto se logra midiendo la corriente que circula por el interruptor la cual debería ser cero al recibir la orden de apertura en las tres fases.

4.3.8. Protección de potencia inversa

La protección de potencia inversa se utiliza para evitar el flujo de potencia activa en una determinada dirección, aplicada básicamente a generadores de potencia. Es importante tomar en cuenta un tiempo cuando la máquina absorbe potencia para sincronizar o cuando se produce una oscilación de potencia para evitar accionamientos falsos.

4.3.9. Protección de frecuencia

La protección de frecuencia toma la señal de tensión midiendo la frecuencia de la onda alterna. Esta protección puede ser para sobrefrecuencia y para subfrecuencia que dependerá del valor previamente establecido.

4.3.10. Protección de impedancia

La protección tipo impedancia opera midiendo la tensión y corriente del circuito para obtener el valor de la impedancia del mismo visto desde el relé.

4.4. Descripción de los números ANSI/IEEE

A continuación se lista la numeración utilizada en los dispositivos eléctricos, en la cual se incluye las protecciones citadas anteriormente.

1. Elemento principal, es el dispositivo de iniciación, tal como el interruptor de control, relé de tensión, interruptor de flotador, etc., que sirve para poner el aparato en operación o fuera de servicio, bien directamente o a través de dispositivos, tales como relés de protección con retardo.
2. Relé de cierre o arranque temporizado, es el que da la temporización deseada entre operaciones de una secuencia automática o de un sistema de protección, excepto cuando es proporcionado específicamente por los dispositivos 48, 62 y 79 descritos más adelante.
3. Relé de comprobación o de bloqueo, es el que opera en respuesta a la posición de un número de condiciones determinadas, en un equipo para permitir que continúe su operación, para que se pare o para proporcionar una prueba de la posición de estos dispositivos o de estas condiciones para cualquier fin.
4. Contacto principal, es un dispositivo generalmente mandado por el dispositivo N° 1 o su equivalente y los dispositivos de permiso y protección necesarios, y sirve para cerrar y abrir los circuitos de control necesarios para reponer un equipo en marcha, bajo las condiciones deseadas o bajo otras condiciones anormales.
5. Dispositivo de parada, es aquel cuya función primaria es quitar y mantener un equipo fuera de servicio.

6. Interruptor de arranque, es un dispositivo cuya función principal es conectar la máquina a su fuente de tensión de arranque.
7. Interruptor de ánodo, es el utilizado en los circuitos del ánodo de un rectificador de potencia, principalmente para interrumpir el circuito rectificador por retorno del encendido de arco.
8. Dispositivo de desconexión de energía de control, es un dispositivo de desconexión (tal como un conmutador de cuchilla, interruptor o bloque de fusibles extraíbles) que se utiliza con el fin de conectar y desconectar, respectivamente, la fuente de energía de control hacia y desde la barra o equipo de control.

Nota.- se considera que la energía de control incluye la energía auxiliar que alimenta aparatos pequeños como motores calefactores.

9. Dispositivo de inversión, es el que se utiliza para invertir las conexiones del campo de una máquina o bien para otras funciones especiales de inversión.
10. Conmutador de secuencia, es el que se utiliza para cambiar la secuencia de conexión o desconexión de unidades de un equipo de unidades múltiples.
11. Reservado para aplicaciones futuras.
12. Dispositivo de exceso de velocidad, es normalmente un interruptor de velocidad de conexión directa que actúa cuando la máquina embala.
13. Dispositivo de velocidad síncrona, es el que funciona con aproximadamente la velocidad normal de una máquina, tal como un conmutador de velocidad centrífuga, relés de frecuencia de deslizamiento, relé de tensión, relé de intensidad mínima o cualquier tipo de dispositivo similar.
14. Dispositivo de falta de velocidad, es el que actúa cuando la velocidad de la máquina desciende por debajo de un valor predeterminado.
15. Dispositivo regulador de velocidad o frecuencia, de una máquina o sistema a un cierto valor o bien entre ciertos límites.
16. Reservado para aplicaciones futuras.
17. Conmutador para puentear el campo serie, sirve para abrir y cerrar un circuito en shunt entre los extremos de cualquier pieza o aparato (excepto una resistencia) tal como el campo de una máquina un condensador o una reactancia.

Nota.- Eso incluye los dispositivos que realizan las funciones de shunt necesarias para arrancar una máquina por los dispositivos 6 ó 42, su equivalente, y también excluye la función del dispositivo 73 que sirve para la operación de las resistencias.

18. Dispositivo de aceleración o declaración, es el que se utiliza para cerrar o hacer cerrar los circuitos que sirven para aumentar o disminuir la velocidad de una máquina.
19. Contactos de transición de arranque a marcha normal. Su función es hacer las transferencias de las conexiones de alimentación de arranque a las de marcha normal de la máquina.
20. Válvula maniobrada eléctricamente, es una válvula accionada por solenoide o motor, que se utiliza en circuitos de vacío, aire, gas, aceite, agua o similares.
21. Relé de distancia, es el que funciona cuando al admitancia, impedancia o reactancia del circuito disminuyen o aumentan a unos límites preestablecidos.
22. Interruptor igualador, sirve para conectar y desconectar las conexiones para actualización de intensidad para los reguladores del campo de la máquina o de la tensión de la máquina, en una instalación de unidades múltiples.
23. Dispositivo regulador de temperatura, es el que funciona para mantener la temperatura de la máquina u otros aparatos dentro de ciertos límites.

Nota.- Un ejemplo es un termostato que enciende un calentador en un elemento de aparellaje, cuando la temperatura desciende a un valor deseado que es distinto de un dispositivo usado para proporcionar regulación de temperatura automática entre límites próximos, y que sería designado como 90T.

24. Sobre excitación. Un relé que funciona cuando la relación V/Hz (tensión/frecuencia) excede un valor pre ajustado. El relé puede tener una característica temporizada o instantánea.
25. Dispositivo de sincronización o puesta en paralelo, es el que funciona cuando dos circuitos de alterna están dentro de los límites deseados de tensión, frecuencia o ángulo de fase, lo cual permite o causa la puesta en paralelo de estos circuitos.
26. Dispositivo térmico, es el que funciona cuando la temperatura del campo en shunt, o el bobinado amortiguador de una máquina, o el de una resistencia de limitación de carga o de cambio de carga, o de un líquido u otro medio, excede de un valor determinado con anterioridad. Si la temperatura del aparato protegido, tal como un rectificador de energía, o de cualquier otro medio, es inferior a un valor fijado con antelación.
27. Relé de mínima tensión, es el que funciona al descender la tensión de un valor predeterminado.
28. Detector de llama, su función es detectar la existencia de llama en el piloto o quemador principal, por ejemplo de una caldera o una turbina de gas.
29. Contactor de aislamiento, es el que se utiliza con el propósito especial de desconectar un circuito de otro, por razones de maniobra de emergencia, conservación o prueba.

30. Relé anunciador, es un dispositivo de reposición no automática que da un número de indicaciones visuales independientes al accionar el dispositivo de protección y además también puede estar dispuesto para efectuar la función de bloqueo.
31. Dispositivo de excitación separada, es el que conecta un circuito, tal como el campo shunt de una conmutatriz, a la fuente de excitación separada durante el proceso de arranque, o bien se utiliza para energizar la excitación y el circuito de encendido de un rectificador.
32. Relé direccional de potencia, es el que funciona sobre un valor deseado de potencia en una dirección dada o sobre la inversión de potencia como por ejemplo, la resultante del retroceso del arco en los circuitos de ánodo o cátodo de un rectificador de potencia.
33. Conmutador de posición, es el que hace o abre contacto cuando el dispositivo principal o parte del aparato, que no tiene un número funcional de dispositivo, alcanza una posición dada.
34. Conmutador de secuencia movido a motor, es un conmutador de contactos múltiples el cual fija la secuencia de operación de los dispositivos principales durante el arranque y la parada, o durante otras operaciones que requieran una secuencia.
35. Dispositivo de cortocircuito de las escobillas o anillos rozantes, es para elevar, bajar o desviar las escobillas de una máquina, o para cortocircuitar los anillos rozantes.
36. Dispositivo de polaridad, es el que acciona o permite accionar a otros dispositivos con una polaridad solamente.
37. Relé de baja intensidad o baja potencia, es el que funciona cuando la intensidad o la potencia caen por debajo de un valor predeterminado.
38. Dispositivo térmico de cojinetes, es el que funciona con temperatura excesiva de los cojinetes.
39. Detector de condiciones mecánicas, es el que tiene por cometido funcionar en situaciones mecánicas anormales (excepto las que suceden a los cojinetes de una máquina, tal y como se escoge en la función 38), tales como vibración excesiva, excentricidad, etc.
40. Relé de campo, es el que funciona por un valor dado, anormalmente bajo, por fallo de la intensidad de campo de la máquina, o por un valor excesivo del valor de la componente reactiva de la corriente de armadura en una máquina de ca, que indica excitación del campo anormalmente baja.
41. Interruptor de campo, es un dispositivo que funciona para aplicar o quitar la excitación de campo de una máquina.
42. Interruptor de marcha, es un dispositivo cuya función principal es la de conectar la máquina a su fuente de tensión de funcionamiento en marcha,

después de haber sido llevada hasta la velocidad deseada desde la conexión de arranque.

43. Dispositivo de transferencia, es un dispositivo accionado a mano, que efectúa la transferencia de los circuitos de control para modificar el proceso de operación del equipo de conexión de los circuitos o de algunos de los dispositivos.
44. Relé de secuencia de arranque del grupo, es el que funciona para arrancar la unidad próxima disponible en un equipo de unidades múltiples cuando falta o no está disponible la unidad que normalmente precede.
45. Detector de condiciones atmosféricas. Funciona ante condiciones atmosféricas anormales, como humos peligrosos, gases explosivos, fuego, etc.
46. Relé de intensidad para equilibrio o inversión de fases, es un relé que funciona cuando las intensidades polifásicas están en secuencia inversa o desequilibrada o contienen componentes de secuencia negativa.
47. Relé de tensión para secuencia de fase, es el que funciona con un valor dado de tensión polifásica de la secuencia de fase deseada.
48. Relé de secuencia incompleta, es el que vuelve al equipo a la posición normal o “desconectado” y lo enclava si la secuencia normal de arranque, funcionamiento o parada no se completa debidamente dentro de un intervalo predeterminado.
49. Relé térmico para máquina, aparato o transformador, es el que funciona cuando la temperatura de la máquina, aparato o transformador excede de un valor fijado.
50. Relé instantáneo de sobre intensidad o de velocidad de aumento de intensidad, es el que funciona instantáneamente con un valor excesivo de velocidad de aumento de intensidad.
51. Relé de sobre intensidad temporizado, es un relé con una característica de tiempo inverso o de tiempo fijo que funciona cuando la intensidad de un circuito de ca sobrepasa un valor dado.
52. Interruptor de ca es el que se usa para cerrar e interrumpir un circuito de potencia de ca bajo condiciones normales, o para interrumpir este circuito bajo condiciones de falta de emergencia.
53. Relé de la excitatriz o del generador de c.c. es el que fuerza un campo de la máquina de c.c. durante el arranque o funciona cuando la tensión de la máquina ha llegado a un valor dado.
54. Reservado para aplicaciones futuras.
55. Relé de factor de potencia, es el que funciona cuando el factor de potencia de un circuito de ca no llega o sobrepasa un valor dado.

56. Relé de aplicación del campo, es el que se utiliza para controlar automáticamente la aplicación de la excitación de campo de un motor de ca en un punto predeterminado en el ciclo de deslizamiento.
57. Dispositivo de cortocircuito o de puesta a tierra, es el que funciona debido al fallo de uno o más de los ánodos del rectificador de potencia, o por el fallo de un diodo por no conducir o bloquear adecuadamente.
58. Relé de fallo de rectificador de potencia, es el que funciona debido al fallo de uno o más de los ánodos del rectificador de potencia, o por el fallo de un diodo por no conducir o bloquear adecuadamente.
59. Relé de sobretensión, es que funciona con un valor dado de sobretensión.
60. Relé de equilibrio de tensión, es el que opera con una diferencia de tensión entre dos circuitos.
61. Relé de parada o apertura temporizada, es el que se utiliza en unión con el dispositivo que inicia la parada total o la indicación de parada o apertura en una secuencia automática.
62. Reservado para aplicaciones futuras.
63. Relé de presión de gas, líquido o vacío, es el que funciona con un valor dado de presión del líquido o gas, para una determinada velocidad de variación de la presión.
64. Relé de protección de tierra, es el que funciona con el fallo a tierra del aislamiento de una máquina, transformador u otros aparatos, o por contorneamiento de arco a tierra de una máquina de cc.

Nota: Esta función se aplica sólo a un relé que detecta el paso de corriente desde el armazón de una máquina, caja protectora o estructura de una pieza de aparatos, a tierra, o detecta una tierra en un bobinado o circuito normalmente no puesto a tierra. No se aplica a un dispositivo conectado en el circuito secundario o en el neutro secundario de un transformador o transformadores de intensidad, conectados en el circuito de potencia de un sistema puesto normalmente a tierra.

65. Regulador mecánico, es el equipo que controla la apertura de la compuerta o válvula de la máquina motora, para arrancarla, mantener su velocidad o detenerla.
66. Relé de pasos, es el que funciona para permitir un número especificado de operaciones de un dispositivo dado o equipo, o bien, un número especificado de operaciones sucesivas con un intervalo dado de tiempo entre cada una de ellas. También se utiliza para permitir el energizado periódico de un circuito, y la aceleración gradual de una máquina.
67. Relé direccional de sobreintensidad de ca es el que funciona con un valor deseado de circulación de sobreintensidad de ca en una dirección dada.

68. Relé de bloqueo, es el que inicia una señal piloto para bloquear o disparar en faltas externas en una línea de transmisión o en otros aparatos bajo condiciones dadas, coopera con otros dispositivos a bloquear el disparo o a bloquear el reenganche con una condición de pérdida de sincronismo o en oscilaciones de potencia.
69. Dispositivo de supervisión y control, es generalmente un interruptor auxiliar de dos posiciones accionado a mano, el cual permite una posición de cierre de un interruptor o la puesta en servicio de un equipo y en la otra posición impide el accionamiento del interruptor o del equipo.
70. Reóstato, es el que se utiliza para variar la resistencia de un circuito en respuesta a algún método de control eléctrico, que, o bien es accionado eléctricamente, o tiene otros accesorios eléctricos como contactos auxiliares de posición o limitación.
71. Relé de nivel líquido o gaseoso. Este relé funciona para valores dados de nivel de líquidos o gases, o para determinadas velocidades de variación de estos parámetros.
72. Interruptor de c.c. es el que se utiliza para cerrar o interrumpir el circuito de alimentación de c.c. bajo condiciones normales o para interrumpir este circuito bajo condiciones de emergencia.
73. Contactor de resistencia de carga, es el que se utiliza para puentear o meter en circuito un punto de la resistencia limitadora, de cambio o indicadora, o bien para activar un calentador, una luz, o una resistencia de carga de un rectificador de potencia u otra máquina.
74. Relé de alarma, es cualquier otro relé diferente al anunciador comprendido bajo el dispositivo 30 que se utiliza para accionar u operar en unión de una alarma visible o audible.
75. Mecanismo de cambio de posición, se utiliza para cambiar un interruptor desconectable en unidad entre las posiciones de conectado, desconectado y prueba.
76. Relé de sobreintensidad de c.c. es el que funciona cuando la intensidad en un circuito de c.c. sobrepasa un valor dado.
77. Transmisor de impulsos, es el que se utiliza para generar o transmitir impulsos, a través de un circuito de Telemidida o hilos pilotos, a un dispositivo de indicación o recepción de distancia.
78. Relé de medio de ángulo de desfase o de protección de salida de paralelo, es el que funciona con un valor determinado de ángulo de desfase entre dos tensiones o dos intensidades, o entre tensión e intensidad.
79. Relé de reenganche de ca es el que controla el reenganche enclavamiento de un interruptor de ca.

80. Relé de flujo líquido o gaseoso, actúa para valores dados de la magnitud del flujo o para determinadas velocidades de variación de éste.
81. Relé de frecuencia, es el que funciona con un valor dado de la frecuencia o por la velocidad de variación de la frecuencia.
82. Relé de reenganche de c.c. es el que controla el cierre y reenganche de un interruptor de c.c. generalmente respondiendo a las condiciones de la carga del circuito.
83. Relé de selección o transferencia del control automático, es el que funciona para elegir automáticamente entre ciertas fuentes de alimentación o condiciones en un equipo, o efectúa automáticamente una operación de transferencia.
84. Mecanismo de accionamiento, es el mecanismo eléctrico completo, o servomecanismo, incluyendo el motor de operación, solenoides, auxiliares de posición, etc., para un cambiador de tomas, regulador de inducción o cualquier pieza de un aparato que no tenga número de función.
85. Relé receptor de ondas portadoras o hilo piloto, es el que es accionado o frenado por una señal y se usa en combinación con una protección direccional que funciona con equipos de transmisión de onda portadora o hilos piloto de c.c.
86. Relé de enclavamiento, es un relé accionado eléctricamente con reposición a mando o eléctrica, que funciona para parar y mantener un equipo fuera de servicio cuando concurren condiciones anormales.
87. Relé de protección diferencial, es el que funciona sobre un porcentaje o ángulo de fase u otra diferencia cuantitativa de dos intensidades o algunas otras cantidades eléctricas.
88. Motor o grupo motor generador auxiliar, es el que se utiliza para accionar equipos auxiliares, tales como bombas, ventiladores, excitatrices, etc.
89. Desconectador de línea, es el que se utiliza como un desconectador de desconexión o aislamiento en un circuito de potencia de ca o cc cuando este dispositivo se acciona eléctricamente o bien tiene accesorios eléctricos, tales como interruptores auxiliares, enclavamiento electromagnético, etc.
90. Dispositivo de regulación, es el que funciona para regular una cantidad, tal como la tensión, intensidad, potencia, velocidad, frecuencia, temperatura y carga a un valor dado, o bien ciertos límites para las máquinas, líneas de unión u otros aparatos.
91. Relé direccional de tensión, es el que funciona cuando la tensión entre los extremos de un interruptor o contactor abierto sobrepasa de un valor dado en una dirección dada.
92. Relé direccional de tensión y potencia, es un relé que permite y ocasiona la conexión de dos circuitos cuando la diferencia de tensión entre ellos excede

de un valor dado en una dirección predeterminada y da lugar a que estos dos circuitos sean desconectados uno del otro cuando la potencia circulante entre ellos excede de un valor dado en la dirección opuesta.

93. Contador de cambio de campo, es el que funciona para cambiar el valor de la excitación de la máquina.
94. Relé de disparo o disparo libre, es el que funciona para disparar o permitir disparar un interruptor, contactor o equipo, o evitar un reenganche inmediato de un interruptor en el caso que abra por sobrecarga, aunque el circuito inicial de mando de cierre sea mantenido.
95. Reservado para aplicaciones especiales.
96. Reservado para aplicaciones especiales.
97. Reservado para aplicaciones especiales.
98. Reservado para aplicaciones especiales.
99. Reservado para aplicaciones especiales.⁵⁷

4.5. Software utilizado para el cálculo

Para obtener un cálculo preciso de la información recopilada, a continuación se describe y se detalla el software que fue utilizado para este trabajo de graduación.

4.5.1. Descripción del software

El programa utilizado para correr el circuito se denomina ELPLEK.

Este es un software gratuito con la aplicación de corto circuito, coordinación de la protección y el flujo de carga para Windows desarrollados por Likka Liukkonen de Finlandia.

⁵⁷ www2.schneiderelectric.com/.../sites/.../Tabla%20de%20Codigos%20ANSI.PDF, consulta: febrero de 2018.

El programa Elplek calcula todas las corrientes en una red en el caso de diferentes fallos (falla de tres fases, falla de dos fases, falla de fase a tierra, falla de dos fases a tierra). Las corrientes de cortocircuito I_k iniciales "pueden calcularse utilizando la método de superposición, o de acuerdo con la norma IEC 60909 (IEC con algunas limitaciones menores).

4.5.2. Criterios utilizados

Los criterios utilizados en la simulación de cortocircuitos en el software fueron los siguientes:

- Método IEC 60909
- La corriente de cortocircuito 25 000A, a 1s
- Frecuencia de 60Hz
- Tipo trifásico
- Se despreciaron las impedancias de las líneas
- Se tomaron constantes los valores X'' y X'
- No se incluyó el sistema de control de los generadores en los cálculos sino que se espera la actuación de las protecciones.

Lo que se busca encontrar en el cálculo es:

- Posibles puntos con falta de coordinación
- Tiempos de operación muy cortos
- Tiempos de operación muy largos
- Protecciones sobredimensionadas
- Protecciones subdimensionadas

4.5.3. Resultados del cálculo

Se simuló un cortocircuito trifásico en cada una de las barras del sistema y cargas utilizando el método IEC 60909.

En las tablas XXXVII a la XLV se muestran los tiempos en que abrirían los interruptores de potencia en cada cortocircuito.

Tabla XXXVII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Torre de enfriamiento**

BARRA	3 FASES					
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Torre enfriamiento	I28	0,07	I28	0,07	I28	0,07
	I14	0,04	I14	0,04	I14	0,04
	I13	0,07	I15	35,41	I7	0,09
	I13	0,74	I15	3,95	I8	0,09
					I9	0,01
					I10	0,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Calderas 4 y 5**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Calderas 4-5	I24	0,08	I24	0,08	I24	0,08	I24	0,08
	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33	I12	0,44
					I25	0,29		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Cachaza**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Cachaza	I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16
	I8	0,73	I8	0,73	I9	0,01	I9	0,01
	I7	0,73	I7	0,73	I10	0,01	I10	0,01
	I13	0,07	I15	35,41	I20	0,43	I11	0,14
	I13	0,74	I15	3,95				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Refinería**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Refinería	I14	0,04	I14	0,04	I14	0,04	I14	0,04
	I13	0,07	I15	35,41	I7	0,09	I7	0,09
	I13	0,74	I15	3,95	I8	0,09	I8	0,09
					I9	0,01	I9	0,01
					I10	0,01	I10	0,01
					I20	0,43	I11	0,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Casa de máquinas**

BARRA	3 FASES									
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Casa máquinas	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33	I12	0,44	I12	0,44
	I12	0,44	I12	0,44	I25	0,29	I4	0,44	I4	0,44
					I12	0,44	I5	0,05	I3	0,22
							I5	0,23		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra 2 Tándem B**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Tándem B-2	I20	0,43	I20	0,43	I20	0,43	I20	0,43
	I10	0,01	I10	0,01	I11	0,14	I11	0,14
	I9	0,01	I9	0,01	I3	0,14	I3	0,14
	I8	0,73	I8	0,73	I4	0,54	I5	0,05
	I7	0,73	I7	0,73			I5	0,32
	I15	35,41	I13	0,07				
	I15	3,95	I13	0,74				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Tándem B**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Tándem B	I8	0,73	I8	0,73	I9	0,01	I9	0,01
	I7	0,73	I7	0,73	I10	0,01	I10	0,01
	I13	0,07	I15	35,41	I20	0,43	I11	0,14
	I13	0,74	I15	3,95				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Turbo 2**

BARRA	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Turbo 2	I13	0,07	I15	35,41
	I13	0,74	I15	3,95
	I7	0,09	I7	0,09
	I8	0,09	I8	0,09
	I9	0,01	I9	0,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Subestación**

BARRA	3 FASES											
Subestación		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
	I3	0,17	I4	0,45	I4	0,45	I4	0,45	I5	0,04	I5	0,04
	I11	0,17	I12	0,45	I12	0,45	I12	0,45	I5	0,29	I5	0,29
	I20	0,53	I22	0,31	I23	0,34	I25	0,76	I4	0,45	I3	0,17
	I10	0,01					I25	0,64				

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los tiempos marcados en color rojo son tiempos muy cortos debido a que la protección secundaria actuarían antes que la protección principal y los tiempos marcados en color verde son tiempos muy extensos.

Se simuló un cortocircuito trifásico también en cada una de las cargas del sistema utilizando el método IEC 60909.

En las tablas XLVI a LII se muestran los tiempos en que abrirían los interruptores de potencia o se fundirían los fusibles asociados a cada carga en cada cortocircuito.

Tabla XLVI. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en las cargas Torre de Enfriamiento 1 y 2**

CARGAS	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Torre enfriamiento 1 y 2	I36	0,02	I37	0,02
	I28	0,07	I28	0,07
	I14	0,04	I14	0,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la cargas Refinería, Silo y Envasado**

CARGAS	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Refinería, Silo y Envasado	I27	3,13	I29	0,02
	I14	0,04	I14	0,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la cargas Tachos, Batch y Cachaza**

CARGAS	3 FASES					
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Tachos, Batch y Cachaza	I30	0,99	I31	0,07	I32	0,99
	I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada Calderas 4 y 5**

CARGAS	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Caldera 4 y 5	I33	0,01	I35	0,01
	I24	0,08	I24	0,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Ingenio**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Ingenio	I21	0,04	I21	0,04	I21	0,04	I21	0,04
	I12	0,44	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Casa de Máquinas**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Casa de Máquinas	I26	0,08	I26	0,08	I26	0,08	I26	0,08
	I12	0,44	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Caldera 7 y Enlace	I16		I16	0,04	I19	0,31	I19	0,31
	I8	0,73	I9	0,01	I8	0,73	I9	0,01

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los tiempos marcados en color rojo son tiempos muy cortos debido a que actuarían antes que la protección principal y los tiempos marcados en color verde son tiempos muy extensos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y AJUSTES PROPUESTOS

En base a los resultados obtenidos del cálculo de fallas de corto circuito, en el presente capítulo se presentan las observaciones que se estiman pertinentes para la seguridad de las personas, procesos y equipos de manera que las protecciones actúen dentro de su capacidad y en un tiempo adecuado.

Para esto tomaremos los resultados de los cálculos realizados en los capítulos 3 y 4.

5.1. Análisis del cálculo de corriente de corto-circuito

A continuación aparece la tabla LIII la cual refleja las corrientes de corto circuito trifásicas y monofásicas en las barras del sistema (calculadas en el capítulo 3) así como los *breaker* asociados (descritos con detalle en capítulo 2), a cada sistema para comparar si los mismos están dentro de los rangos adecuados para la protección.

Tabla LIII. **Corrientes de cortocircuito y capacidad interruptiva de los interruptores utilizados en el Ingenio**

Barra	Corriente de corto circuito		Interruptores y Fusibles		No.	Capacidad (A)
	Trifásico (A)	Monofásico (A)	No.	Capacidad (A)		
1	4 448,30	5 305,07	I1	31 500	I2	40 000
1	4 448,30	5 305,07	I3	31 500	I4	31 500
1	4 448,30	5 305,07	I5	31 500		
2	20 314,72	26 025,87	I6	25 000	I7	25 000
2	20 314,72	26 025,87	I13	25 000	I14	25 000
2	20 314,72	26 025,87	I15	25 000		
3	20 526,37	26 046,33	I8	18 000	I9	18 000
3	20 526,37	26 046,33	I16	18 000	I17	18 000
3	20 526,37	26 046,33	I18	18 000	I19	18 000
4	20 577,31	25 780,15	I10	25 000	I11	25 000
4	20 577,31	25 780,15	I20	25 000		
5	20 837,46	31 170,20	I12	25 000	I21	25 000
5	20 837,46	31 170,20	I22	25 000	I23	25 000
5	20 837,46	31 170,20	I24	25 000	I25	25 000
5	20 837,46	31 170,20	I26	25 000		
6	19 661,80	24 485,41	I14	25 000	I27	25 000
6	19 661,80	24 485,41	I28	25 000	I29	25 000
7	19 642,48	23 924,45	I18	18 000	I30	25 000
7	19 642,48	23 924,45	I31	25 000	I32	25 000
8	20 754,28	30 835,13	I24	25 000	I33	25 000
8	20 754,28	30 835,13	I34	25 000	I35	25 000
9	3 392,88	18 791,08	I28	25 000	I36	38 000
9	3 392,88	18 791,08	I37	38 000		

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla mostrada anteriormente, los interruptores instalados en la barra número 3 denominada Barra tándem B, el cual está compuesto por los interruptores I8, I9, I16, I17, I18 e I19, (ver unifilar en el capítulo 3), no cumple con las características de protección necesarias para un cortocircuito de la magnitud descrita en los cálculos.

Nota: La capacidad interruptiva de corto circuito de los interruptores descritos corresponde a corriente simétrica, es por ello que se está tomando en cuenta únicamente la corriente trifásica.

Por lo anterior es necesario invertir en una nueva barra con capacidad de 25 kA para garantizar la apertura de los interruptores sin riesgo de destrucción de los mismos.

5.2. Análisis del cálculo de tiempo de orden de apertura por los relés

Se simularon en el programa Elplek cortocircuitos en las barras y en las cargas del sistema de mediana tensión del ingenio, adecuando los tiempos de apertura de cada uno de los relés.

5.2.1. Al simular un cortocircuito en las barras

Los tiempos calculados en la barra torre de enfriamiento, al simular un cortocircuito en dicha barra, muestran que el tiempo de apertura del interruptor denominado I15 es relativamente largo (ver tabla XLV). Este interruptor puede ser disparado tanto por el relé que protege el transformador como por el relé que protege el generador de dicho circuito.

Se modificó el multiplicador de tiempo para accionamiento del relé del transformador, se cambió de 1,00 a 0,06 y el set se cambió de 120A a 100A. También se modificó el multiplicador de tiempo del relé del generador de 3,00 a 0,25 y el set se cambió de 4 000A a 2 400A.

También se cambió el set de 200A a 300A en el relé que acciona el interruptor I14, ya que el mismo está muy bajo. Y el multiplicador se cambió de 1,0 a 1,5

El tiempo del I28 es más alto que el I14, pero esto es debido que el I28 es un fusible mientras que el I14 es un relé.

Por lo anterior, los tiempos de accionamiento quedan con los valores descritos en la tabla LIV.

Tabla LIV. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Torre de Enfriamiento**

BARRA	3 FASES					
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Torre Enfriamiento	I28	0,77	I28	0,77	I28	0,77
	I14	0,06	I14	0,06	I14	0,06
	I13	0,42	I15	0,88	I7	0,08
	I13	0,59	I15	1,25	I8	0,08
					I9	0,16
					I10	0,16

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos calculados en la barra calderas 4 y 5 son adecuados, por lo que no se hizo ninguna observación. (Ver tabla XXXVII). Pero debido a que se han modificado valores en varios relés, a continuación se presenta la tabla LXIII donde están los tiempos de accionamiento de los interruptores en esta barra al simular un cortocircuito.

Tabla LV. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Calderas 4 y 5**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Calderas 4-5	I24	0,08	I24	0,08	I24	0,08	I24	0,08
	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33	I12	0,29
					I25	0,29		

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos calculados en la barra Cachaza, al simular un cortocircuito en dicha barra, muestran que el tiempo de apertura del interruptor denominado I13 es relativamente corto (ver tabla XXXVIII). Este interruptor puede ser disparado tanto por el relé que protege el transformador como por el relé que protege el generador de dicho circuito.

En el caso del accionamiento del generador tiene un tiempo adecuado, en cambio el de transformadores no, por lo que se modificó el multiplicador de tiempo de accionamiento de 1,0 a 3,0

También el interruptor denominado I9 e I10 tienen un tiempo de apertura relativamente corto (ver tabla XXXVIII), se modificó el set de 1 500A a 750A debido a que el valor estaba sobredimensionado.

También el interruptor denominado I11 tienen un tiempo de apertura relativamente corto (ver tabla XXXVII), se cambió el multiplicador de tiempo de dicho relé de 2,0 a 4,0

También el interruptor denominado I15 tienen un tiempo de apertura relativamente largo (ver tabla XXXVIII), se cambió el multiplicador de dicho relé de 2,0 a 4,0

Por lo anterior, los tiempos de accionamiento al simular un cortocircuito en la barra Cachaza quedan con los valores descritos en la tabla LVI.

Tabla LVI. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Cachaza**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Cachaza	I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16
	I8	0,39	I8	0,73	I9	0,16	I9	0,16
	I7	0,39	I7	0,73	I10	0,16	I10	0,16
	I13	0,42	I15	0,88	I20	0,43	I11	0,28
	I13	0,59	I15	1,25				

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos calculados en la barra Refinería, al simular un cortocircuito en dicha barra, muestran que el tiempo de apertura del interruptor denominado I15 era relativamente largo (ver tabla XXXIX). Pero debido a la modificación realizada con este relé al analizar la barra torre enfriamiento, al correr de nuevo la simulación dio valores aceptables por lo que no se realizó ninguna modificación adicional.

El mismo caso ocurrió con el interruptor I9 e I10 en los cuales los tiempo de apertura eran relativamente cortos, pero por modificar valores al analizar la barra Cachaza al correr nuevamente la simulación dio valores aceptables.

En la tabla LVII se muestran los valores de accionamiento de los relés asociados al simular un cortocircuito en la barra Refinería.

Tabla LVII. Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Refinería

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Refinería	I14	0,04	I14	0,04	I14	0,04	I14	0,04
	I13	0,42	I15	0,88	I7	0,08	I7	0,09
	I13	0,59	I15	1,25	I8	0,08	I8	0,09
					I9	0,16	I9	0,16
					I10	0,16	I10	0,16
					I20	0,36	I11	0,28

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos calculados en la barra Casa de Máquinas, al simular un cortocircuito en dicha barra, muestran que el tiempo de apertura del interruptor denominado I5 es relativamente corto (ver tabla XLIX). Se cambió el valor del multiplicador de este interruptor de 1,0 a 7,0 también se modificó el set de apertura de 360A a 315A debido a que estaba muy alto.

También se modificó el multiplicador del relé de los interruptores I4 e I12 de 6,0 a 4,0.

El tiempo de apertura del interruptor I3 era relativamente corto (ver tabla XL), pero debido a las modificaciones realizadas al correr las simulaciones en las barras descritas anteriormente al correr nuevamente la simulación estos caen dentro de valores aceptables.

A continuación, la tabla LVIII muestra los nuevos valores de apertura para los circuitos asociados a la barra Casa de Máquinas al simular un cortocircuito en dicha barra.

Tabla LVIII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Casa de Máquinas**

BARRA	3 FASES									
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Casa Máquinas	I22		I23	0,31	I25	0,33	I12	0,29	I12	0,29
	I12	0,29	I12	0,29	I25	0,29	I4	0,29	I4	0,29
					I12	0,29	I5	0,32	I3	0,45
							I5	0,31		

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos calculados en la barra 2 Tándem B, al simular un cortocircuito en dicha barra, muestran algunos tiempos que deben modificarse.

Debido a que ya se realizaron varias modificaciones en los relés, se mencionaran de aquí en adelante solo los nuevos cambios realizados.

Se modificó el set de corriente del relé que acciona el interruptor I20 de 1 725A a 1 375A debido a que el valor de disparo estaba muy alto.

El multiplicador del relé que acciona los interruptores I9 e I10 se dejó en 4.0, el tiempo de apertura de estos interruptores es muy largo pero no se bajó más porque eso afecta el tiempo al ocurrir fallas en otras barras.

A continuación se muestra la tabla LIX en la cual se muestran los nuevos valores de apertura para los circuitos asociados a la barra 2 Tándem B.

Tabla LIX. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra 2 Tándem B**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Tándem B- 2	I20	0,28	I20	0,28	I20	0,28	I20	0,28
	I10	2,70	I10	2,70	I11	0,28	I11	0,28
	I9	2,70	I9	2,70	I3	0,28	I3	0,28
	I8	0,39	I8	0,39	I4	0,36	I5	0,32
	I7	0,39	I7	0,39			I5	0,32
	I15	0,88	I13	0,42				
	I15	1,25	I13	0,59				

Fuente: elaboración propia.

Debido a las modificaciones realizadas anteriormente, al simular un corto circuito en la barra Tándem B, no se necesita ningún otro cambio ya que los valores resultantes son adecuados.

En la tabla LX se muestran los nuevos valores de apertura para los circuitos asociados a la barra Tándem B.

Tabla LX. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Tándem B**

BARRA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Tándem B	I8	0,39	I8	0,39	I9	0,16	I9	0,16
	I7	0,39	I7	0,39	I10	0,16	I10	0,16
	I13	0,42	I15	0,88	I20	0,28	I11	0,28
	I13	0,59	I15	1,25				

Fuente: elaboración propia.

Debido a las modificaciones realizadas anteriormente, al simular un corto circuito en la barra Turbo 2, no se hará ningún otro cambio ya que los valores resultantes aislarían la zona con falla aun cuando esta lo haría en un tiempo más corto; al analizar el unifilar esto no afecta la selectividad.

En la tabla LXI se muestran los nuevos valores de apertura para los circuitos asociados a la barra Turbo 2.

Tabla LXI. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Turbo 2**

BARRA	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Turbo 2	I13	0,42	I15	0,88
	I13	0,59	I15	1,25
	I7	0,08	I7	0,08
	I8	0,08	I8	0,08
	I9	0,16	I9	0,16

Fuente: elaboración propia.

Al igual que en los últimos casos con las modificaciones realizadas anteriormente al simular un corto circuito en la barra Subestación no se hará ningún otro cambio ya que los valores resultantes son adecuados.

En la tabla LXII se muestran los nuevos valores de apertura para los circuitos asociados a la barra Subestación.

Tabla LXII. **Tiempo de apertura de los interruptores en un cortocircuito en la barra Subestación**

BARRA	3 FASES											
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Subestación	I3	0,35	I4	0,30	I4	0,30	I4	0,30	I5	0,29	I5	0,29
	I11	0,35	I12	0,30	I12	0,30	I12	0,30	I5	0,30	I5	0,30
	I20	0,36	I22	0,31	I23	0,34	I25	0,76	I4	0,30	I3	0,35
	I10	4,79					I25	0,64				

Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Al Simular de un cortocircuito en las cargas

El fusible I28 utilizaba un fusible de 100A el cual es un valor muy bajo para las cargas asociadas por lo que se colocó un fusible de 150A con lo cual la curva del mismo nos modificó el tiempo de apertura del mismo. En la tabla LXIII se muestran los nuevos valores al simular un corto circuito en las cargas torre de enfriamiento 1 y 2.

Tabla LXIII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Torre Enfriamiento 1 y 2**

CARGAS	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Torre Enfriamiento 1 y 2	I36	0,02	I37	0,02
	I28	0,77	I28	0,77
	I14	0,06	I14	0,06

Fuente: elaboración propia.

El fusible I27 utilizaba un fusible de 200A el cual es un valor alto para las cargas asociadas por lo que se colocó un fusible de 125A con lo cual la curva del mismo modificó el tiempo de apertura del mismo. En la tabla LXIV se muestran los nuevos valores al simular un corto circuito en las cargas Refinería silo y envasado.

Tabla LXIV. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Refinería, Silo y Envasado**

CARGAS			3 FASES			
				Tiempo (s)		Tiempo (s)
Refinería, Silo y Envasado		I27	0,12	I29	0,02	
		I14	0,04	I14	0,04	

Fuente: elaboración propia.

Los fusibles I30, I31 e I32 utilizaban dos fusibles por fase de 200A el cual es un valor alto para las cargas asociadas por lo que se colocó un fusible por fase de 100A con lo cual la curva del mismo nos modificó el tiempo de apertura del mismo. En la tabla LXV se muestran los nuevos valores al simular un corto circuito en las cargas Refinería silo y envasado.

Tabla LXV. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Tachos, Batch y Cachaza**

CARGAS			3 FASES				
				Tiempo (s)		Tiempo (s)	
Tachos, Batch y Cachaza		I30	0,02	I31	0,02	I32	0,02
		I18	0,16	I18	0,16	I18	0,16

Fuente: elaboración propia.

Los fusibles asociados con las cargas calderas 4 y 5 no se ve necesaria ninguna modificación por lo que solo se presenta la tabla LXVI como evidencia de cómo quedan los valores al simular un cortocircuito en dichas cargas.

Tabla LXVI. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Caldera 4 y 5**

CARGAS	3 FASES			
		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Caldera 4 y 5	I33		I35	1,03
	I24	0,08	I24	0,08

Fuente: elaboración propia.

El relé que acciona el interruptor I21 tenía un set de 2 700A el cual es un valor muy alto para las cargas asociadas por lo que se colocó un set de 1 200A. En la tabla LXVII se muestran los valores al simular un corto circuito en las carga denominada Ingenio.

Tabla LXVII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Ingenio**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Ingenio	I21	0,04	I21	0,04	I21	0,04	I21	0,04
	I12	0,29	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33

Fuente: elaboración propia.

El relé que acciona el interruptor asociado a la carga Casa de máquinas no se ve necesaria ninguna modificación por lo que solo se presenta la tabla LXVIII como evidencia de cómo quedan los valores al simular un cortocircuito en dichas cargas.

Tabla LXVIII. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga asociada a la carga Casa de Máquinas**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Casa de máquinas	I26	0,08	I26	0,08	I26	0,08	I26	0,08
	I12	0,29	I22	0,29	I23	0,31	I25	0,33

Fuente: elaboración propia.

El relé que acciona el interruptor I16 tenía un set de 360A el cual es un valor alto para las cargas asociadas por lo que se colocó un set de 150A. En el caso del relé que acciona el interruptor I19 no se hizo ninguna modificación por que los valores están dentro de lo aceptable.

En la tabla LXIX se muestran los valores al simular un corto circuito en las cargas denominadas Caldera 7 y enlace.

Tabla LXIX. **Tiempo de apertura de los fusibles e interruptores en un cortocircuito en la carga Caldera y Enlace**

CARGA	3 FASES							
		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)		Tiempo (s)
Caldera 7 y Enlace	I16	0,04	I16	0,04	I19	0,31	I19	0,31
	I8	0,42	I9	0,16	I8	0,42	I9	0,16

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se hizo la recopilación de información de cada uno de los equipos asociados al sistema mediana tensión, y las protecciones que tienen estos equipos.
2. Los resultados obtenidos del estudio de cortocircuito en el sistema en estudio muestran que, en general los valores están dentro de las capacidades interruptivas requeridas, con excepción a la barra denominada Tándem B.
3. Se simularon fallas en cada una de las barras y en las cargas en el sistema de mediana tensión, obteniendo con ellos los tiempos de apertura de los equipos de protección.
4. Se encontraron valores sobredimensionados de sobrecorriente en cuatro relés, estos son los asociados con los interruptores I15, I14, I9-I10, I5, I20, I21 e I16. Se encontraron fusibles sobredimensionados, que son: I27, I30, I31 e I32, y un fusible subdimensionado, que es el I28. Al multiplicador de algunos relés se les puede mejorar el tiempo de respuesta. Los relés asociados a los interruptores: I22 la protección de alto nivel de sobrecorriente, I25 la protección de sobrefrecuencia, I1 e I24 la protección de sobrecorriente instantánea, no están habilitadas.

RECOMENDACIONES

1. Actualizar por lo menos cada tres años la información de los equipos y sus protecciones, que por lo general las empresas como los ingenios tienden a crecer y por consiguiente su matriz energética cambia.
2. Verificar la capacidad de la barra Tándem B; si es de 18 000A sustituirla por una de 25 000A, para garantizar la seguridad de las personas, proceso y equipo al presentarse una falla.
3. Realizar un cálculo de cortocircuito y simulación de coordinación de protecciones aguas debajo de 13 800 V, sin duda será necesario realizar algunos ajustes en estos niveles de tensión.
4. Ajustar los valores de los relés I15, I14, I9-I10, I5, I20, I21 e I16. Cambiar los fusibles I27, I28, I30, I31 e I32. Modificar los multiplicadores de algunos relés. Todo esto de acuerdo a lo señalado en el capítulo V. Habilitar la protección de alto nivel de sobrecorriente al relé asociado al interruptor I22, la protección de sobrefrecuencia al relé asociado al interruptor I25, la protección de sobrecorriente instantánea a los relés asociados a los interruptores I1 e I24.

BIBLIOGRAFÍA

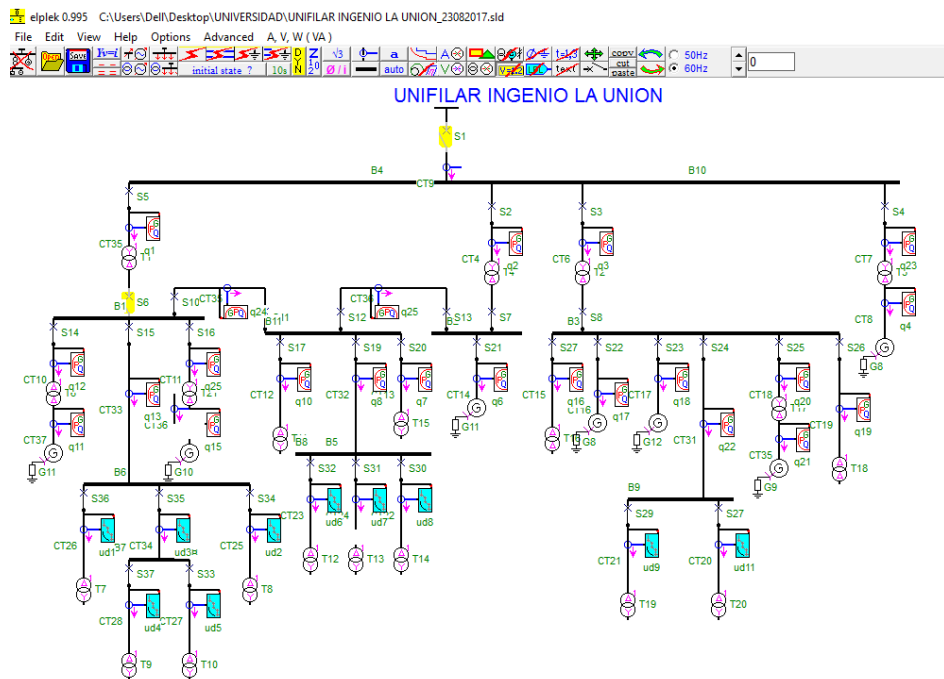
1. CASTAÑO, Samuel Ramiro, Protecciones de sistemas eléctricos, 1ra ed. Colombia: 664 p.
2. Central Station Engineers of the Westinghouse electric corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 2da ed. 1950. 824 p.
3. CHAPMAN, Stephen J, Máquinas eléctricas, 4ta ed. México: McGraw-Hills / Interamericana, 2005. 746 p.
4. Descripción de los números ANSI / IEEE. [en línea]. <www2.schneiderelectric.com/.../sites/.../Tabla%20de%20Codigos%20ANSI.PDF>. [Consulta: febrero 2018].
5. FRAILE MORA, Jesús, Máquinas eléctricas, 5ta ed. España: McGraw-Hills / Interamericana, 2003. 756 p.
6. General Electric, 745 Transformer Protection System Instruction Manual, Canada: 2008. 314 p.
7. General Electric, 489 Generator Management Relay Instruction Manual, Canada: 2010. 314 p.
8. General Electric, 750/760 Feeder Management Relay Instruction Manual, Canada: 2010. 452 p.

9. GONZÁLES GONZÁLES, Gabriel, LUNA URIAS, Enrique Oswaldo, Análisis de cortocircuito a sistemas eléctricos, 153 p.
10. LEIKKONEN, Likka, Elplek help, Finlandia: 246 p.
11. M. GONZÁLES-LONGATT, Francisco. Anormalidades en sistemas eléctricos de potencia. [en línea]. <http://fglongatt.org/OLD/Archivos/Archivos/SP_I/PPT-4.Anorm.pdf>. [Consulta: enero del 2016].
12. Sel, SEL-311B Protection and Automation System, Estados Unidos: 2000-2016, 24 p.
13. STEVENSON JR, William D. Análisis de sistemas eléctricos de potencia, 2da ed. México: 1993. 383 p.

APÉNDICES

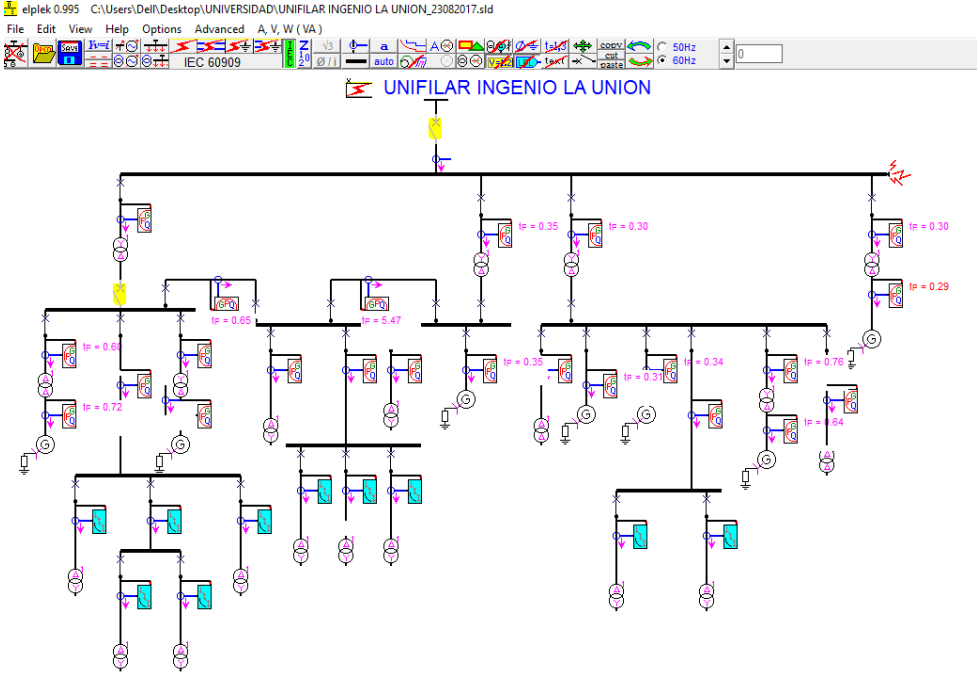
Capturas del programa al realizar las simulaciones.

Apéndice 1. Diagrama unifilar simulado en el programa Elplek



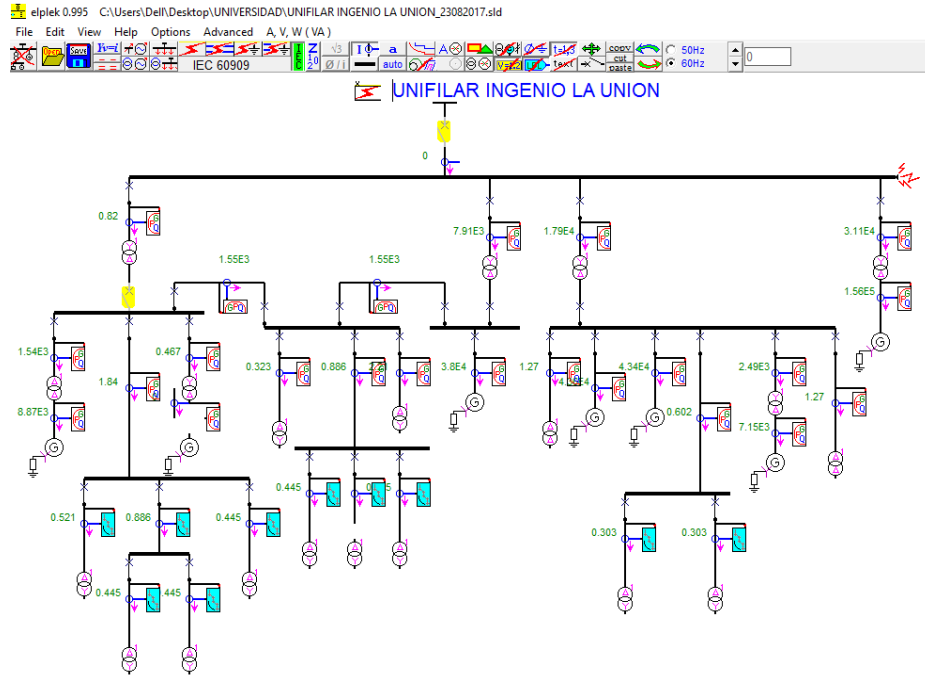
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 2. **Tiempos de reacción de los relés al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



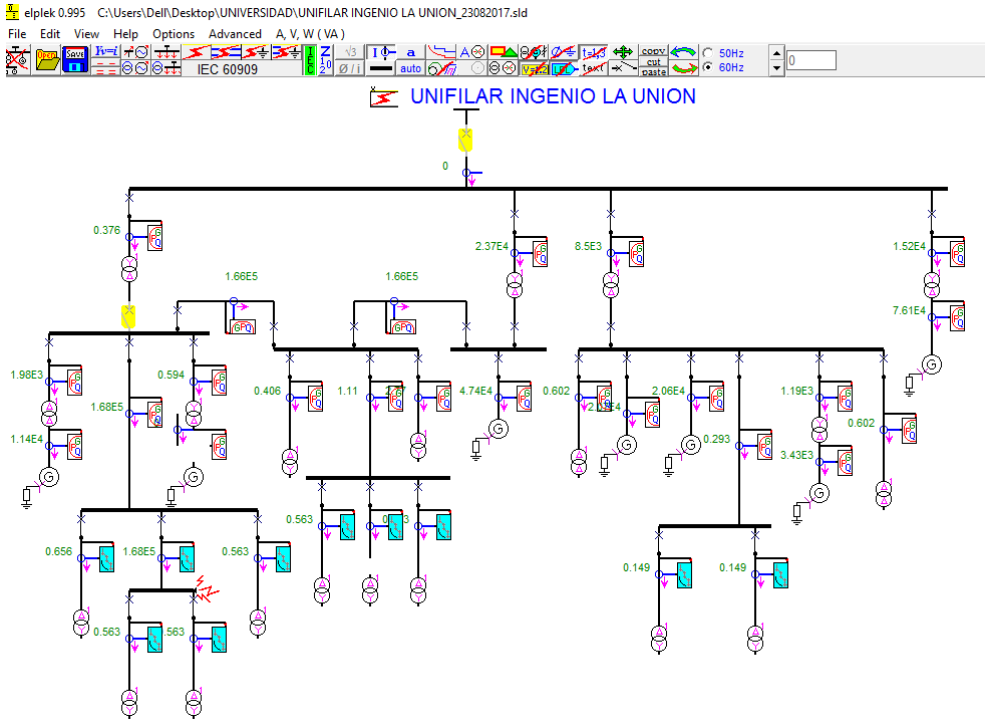
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 3. Corrientes en los Ct's al simular un cortocircuito en la barra Subestación



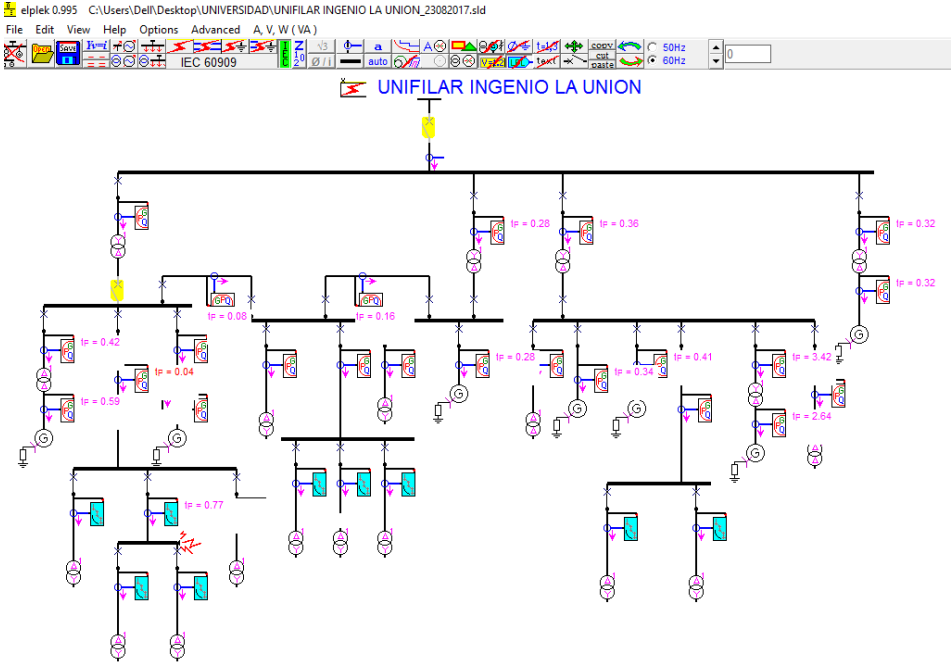
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 4. Corrientes en los Ct's al simular un cortocircuito en la barra Torre Enfriamiento



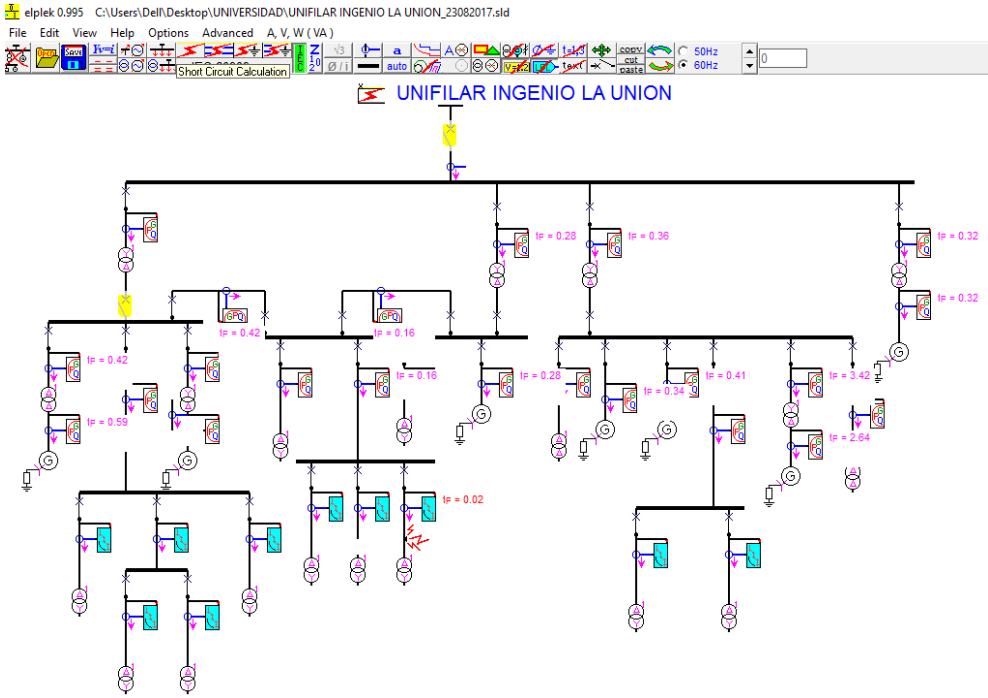
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 5. Tiempos de reacción de los relés al simular un cortocircuito en la barra Torre Enfriamiento



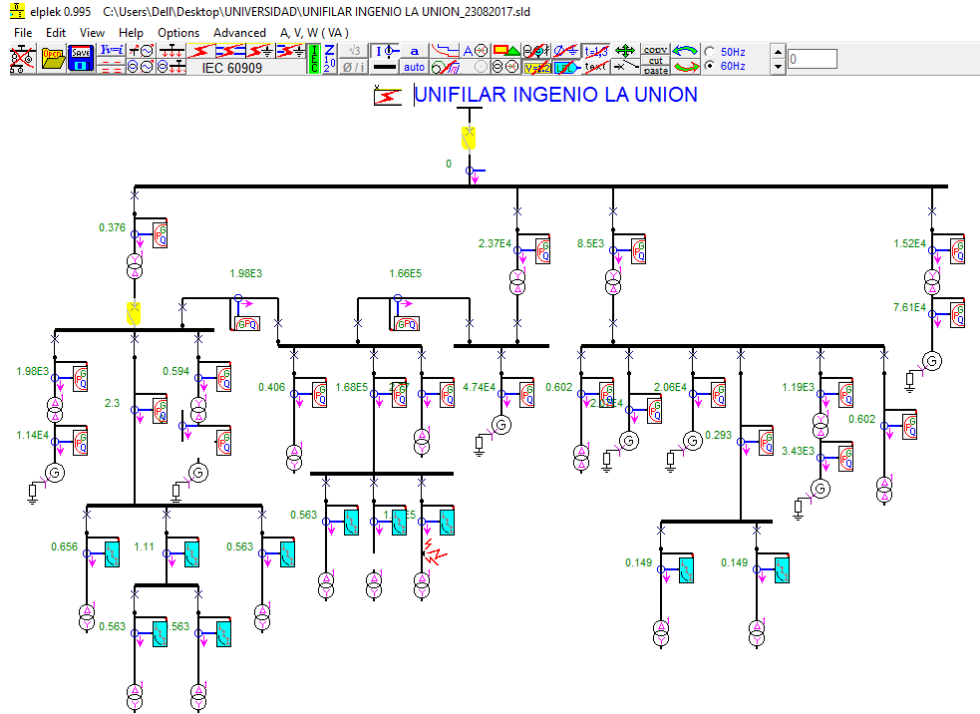
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 6. **Tiempos de reacción de los relés al simular un cortocircuito en la carga Cachaza**






Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 7. Corrientes en los Ct's al simular un cortocircuito en la carga Cachaza



Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 8. Parámetros del relé que acciona el interruptor I3 e I11

q2			
File Texts View Options Edition plane < group 1 >			
M Help			
Mode	A-prim	CT ratio1	Inom Sec 1
Connect. Y			
Curve Time Element (51)	51P	51G	51Q(I₂)
Curve group	4 ANSI	1 IEC	1 IEC
Curve	2 very	1 standard	1 standard
Set current [A, prim]	261	0	0
Factor OR Start time (if > 3)	0	0	0
Curve modifiers t ⁿ = B t+C			
B = Time multiplier	4	0	0
C = Time adder (s)	0	0	0
tx = Min.response time(s)	0	0	0
Definite Time Element (50)	50P	50G	50Q(I₂)
Pickup Def 1 [A, prim]	0	0	0
Delay Def 1[s]	0	0	0
Pickup Def 2 [A, prim]	0	0	0
Delay Def 2 [s]	0	0	0
Pickup Def 3 [A, prim]	0	0	0
Delay Def 3 [s]	0	0	0
Pickup Def 4 [A, prim]	0	0	0
Delay Def 4 [s]	0	0	0
Common			
Max current [A,prim]	324	0	0
Directional (0 = no)	0	0	0
Z line (ohms)	0	0	0
Ø line (°)	0	0	0
Show curve and Act. test	1	0	0
Line thickness (0...4)	2	0	0
Color	2 	1 	1 
Spare	0	0	0
Activation test	test	no test	no test
current [A,prim](calc. time)	0	0	0
time (calculate current)			
multiples of p.u. current			

momentary mode

Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 9. **Parámetros del transformador T2**

T4			
A _v Ω	PU	Z(%)	curve
	A, V, Ohm		
V1	69e3		
V2	13.8e3		
X	1		
R	0.1		
Io1	0.7364		
X0	1		
R0	1		
Rg1	1e6		
Xg1	1e6		
tap	5		
+30?	0		
VAn	22e6		
Vs1	0		
Vs2	0		
tmin	1		
tmax	1		
parall	1		

OK Cancel Hint

Ampacity

Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 10. **Parámetros del Generador G7**

G11

AvΩ	PU	Z(°/1)
		A, V, Ohm
Vn		13.8e3
Rs		0.0125
X		1.94
fi		0
X'		0.22
X''		0.17
T'		1.05
T''		0.03
X0		0.11
X2		0.17
Xq'		0.7
Xq''		0.24
Tq'		0
Tq''		0.03
P		22e6
VAn		27.5e6
pf		0.8
Vs		0
paral		1

OK Cancel Hint

Ámpacity

Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 11. Parámetros del Fusible I28

ud3#						
File Texts View Options Edition plane < group 1 > M						
Mode	A-prim	CT ratio 1	Inom Sec 1	Connect. Y		
Curve Time Element (51)	51P	51P	51G	51G	51Q	51Q
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Curve	S 1Amax	userdef	userdef	userdef	userdef	userdef
Set current [A, prim]	150	0	0	0	0	0
Factor (n) OR start time (if > 3)	1	0	0	0	0	0
Curve modifiers $t'' = B t + C$	C1	C2	C1	C2	C1	C2
B = Time Multiplier	1	0	0	0	0	0
C = Time Adder (s)	0	0	0	0	0	0
tx = Min Response (s)	0	0	0	0	0	0
Definite Time Element (50)	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Pickup Def 1 [A, prim]	0	0	0	0	0	0
Delay Def 1 [s]	0	0	0	0	0	0
Pickup Def 2 [A, prim]	0	0	0	0	0	0
Delay Def 2 [s]	0	0	0	0	0	0
Pickup Def 3 [A, prim]	0	0	0	0	0	0
Delay Def 3 [s]	0	0	0	0	0	0
Pickup Def 4 [A, prim]	0	0	0	0	0	0
Delay Def 4 [s]	0	0	0	0	0	0
Common	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Max current [A, prim]	161	0	0	0	0	0
Directional (0 = no)	0	0	0	0	0	0
Z line (ohms)	0	0	0	0	0	0
∅ line (°)	0	0	0	0	0	0
Show curve and Act. test	1	0	0	0	0	0
Line thickness (0...4)	2	0	0	0	0	0
Color	15	1	1	1	1	1
Spare	0	0	0	0	0	0
Activation test	test	no test	no test	no test	no test	no test
current [A, prim][calc. time]	0	0	0	0	0	0
time (calculate current)				0	0	0
relative current						

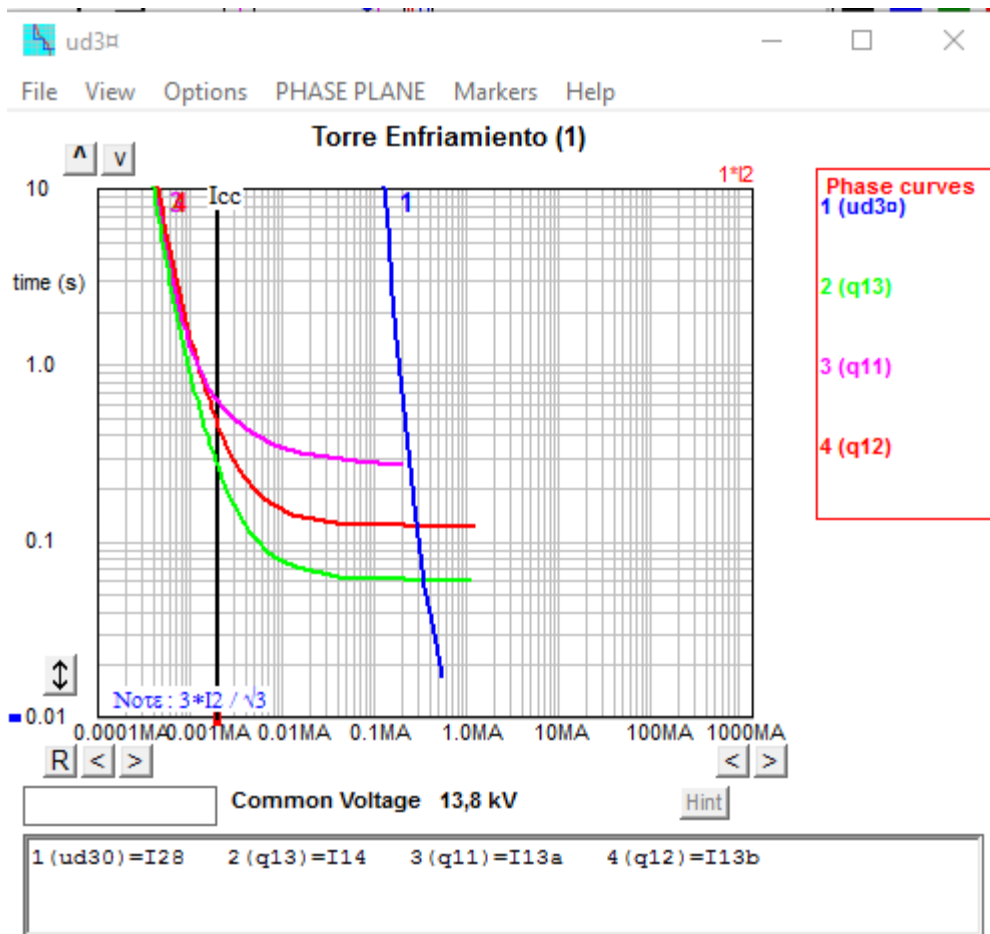
momentary mode
A prim | A sec | x Inom

OK Cancel Apply Hint

Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

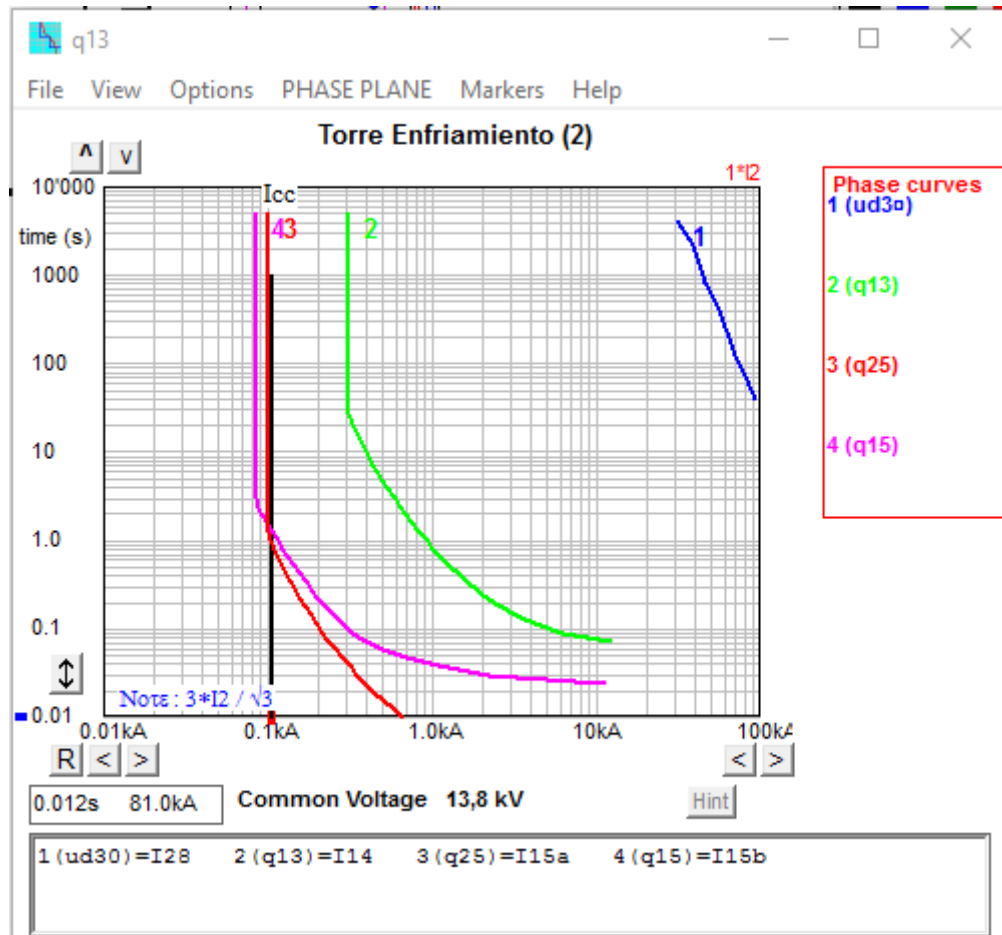
Capturas de gráficas de coordinación en el programa Elpelk.

Apéndice 12. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra torre enfriamiento**



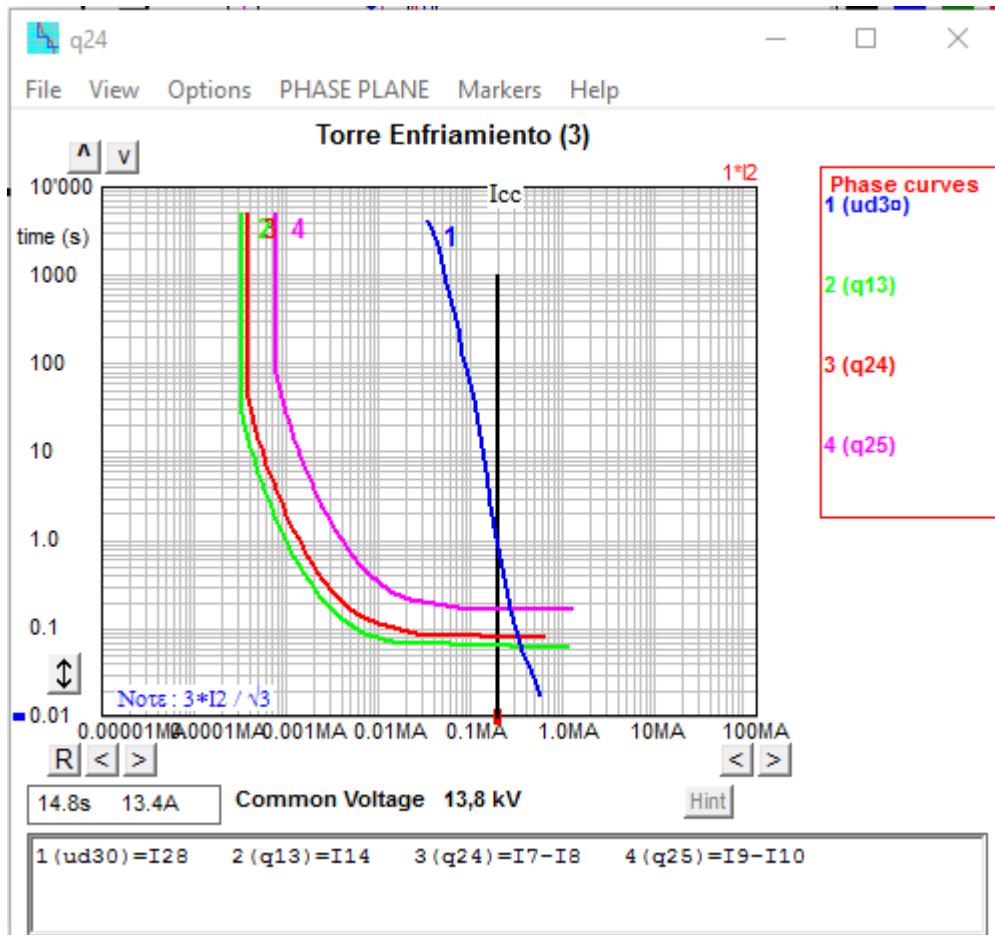
Fuente: elaboración propia, empleando Elpelk.

Apéndice 13. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra torre enfriamiento**



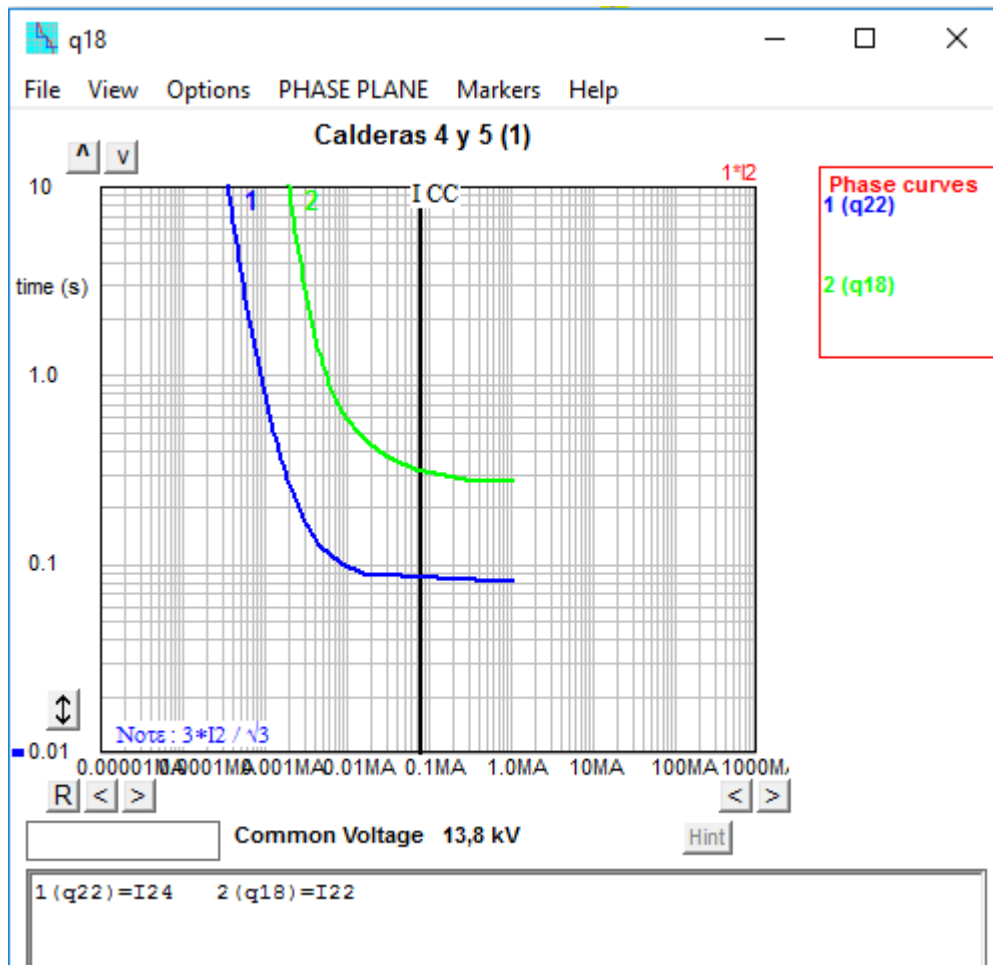
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 14. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra torre enfriamiento**



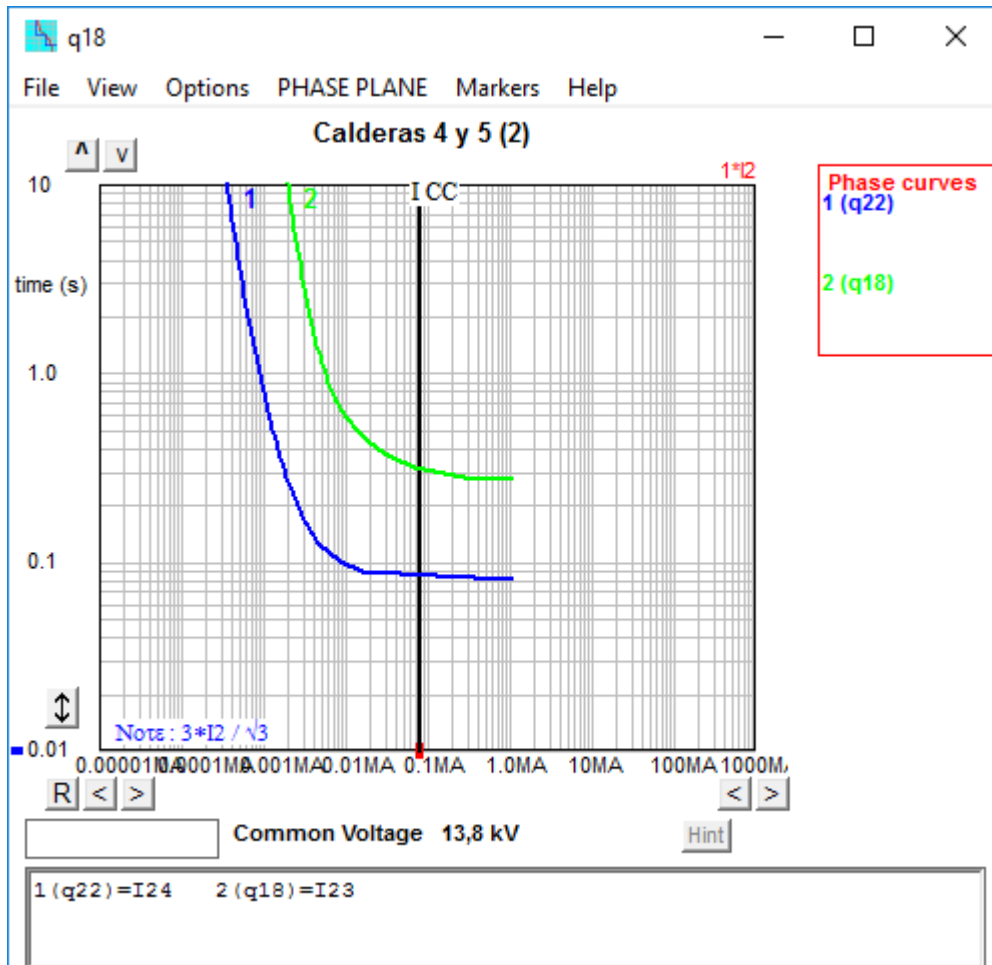
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 15 **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra calderas 4 y 5**



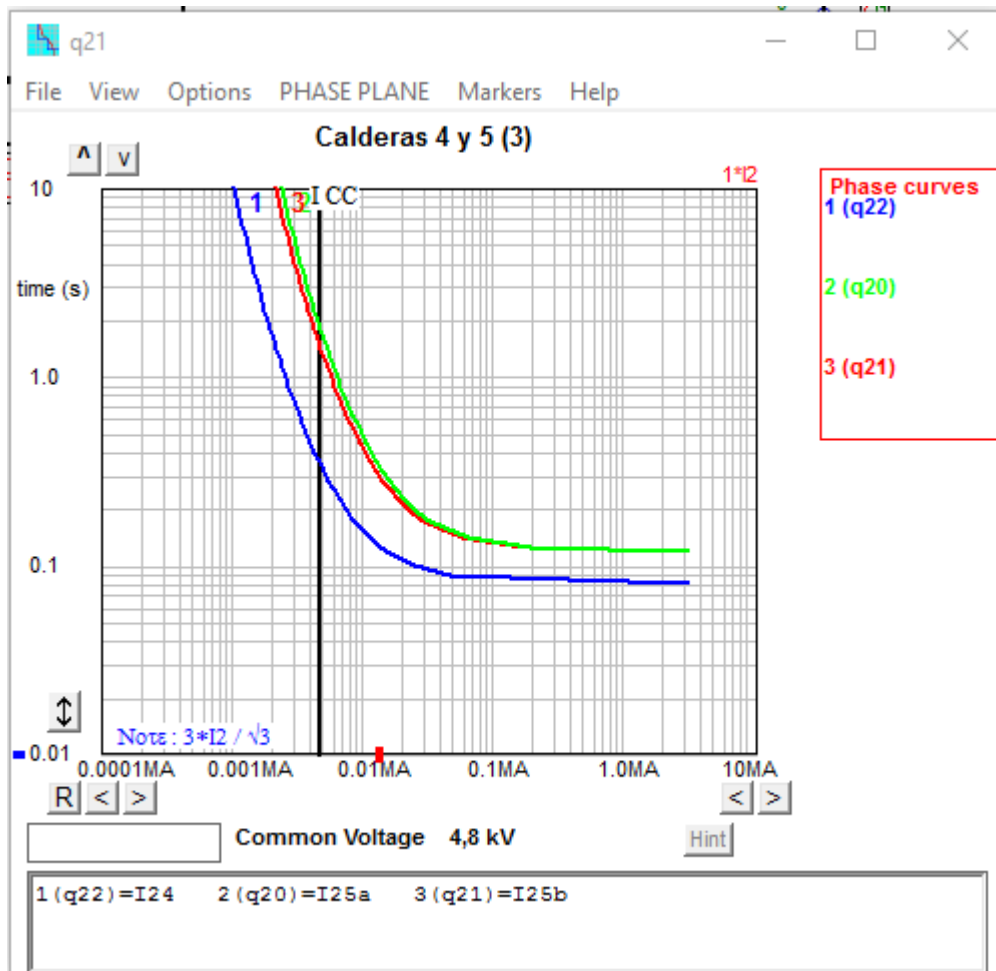
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 16. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra calderas 4 y 5**



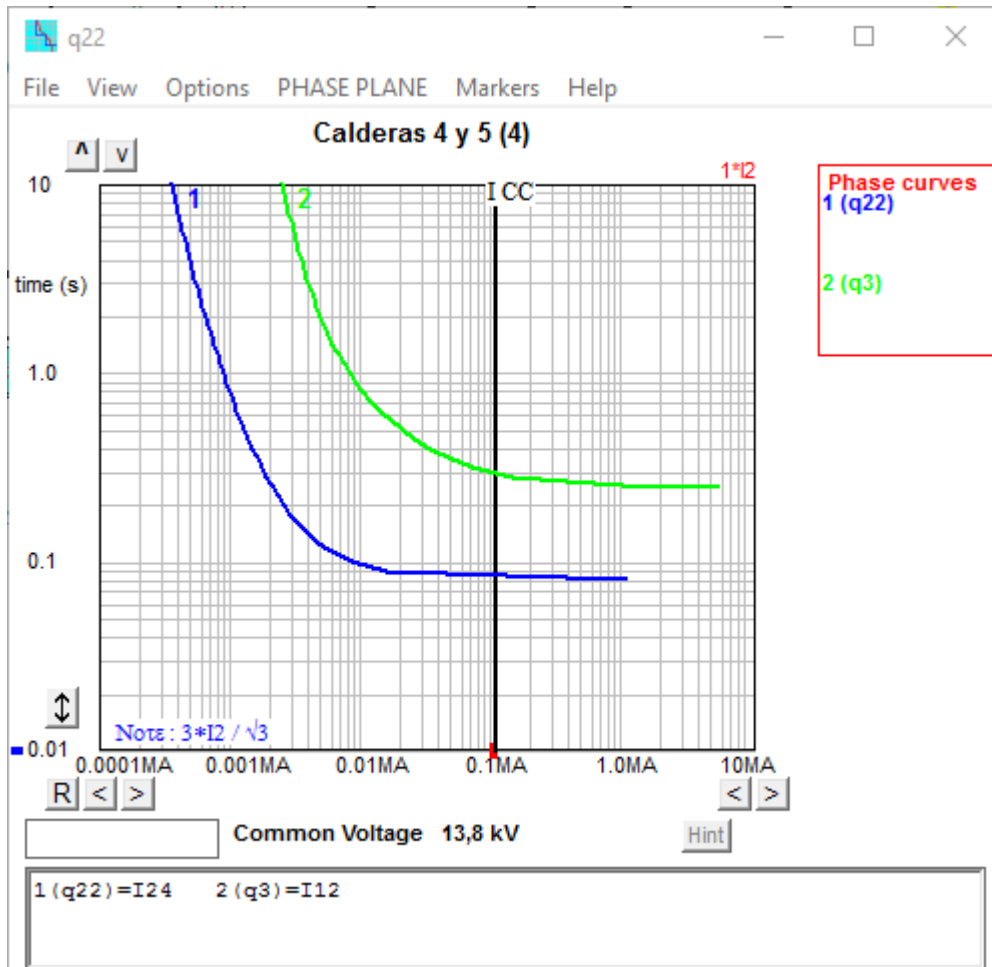
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 17. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra calderas 4 y 5**



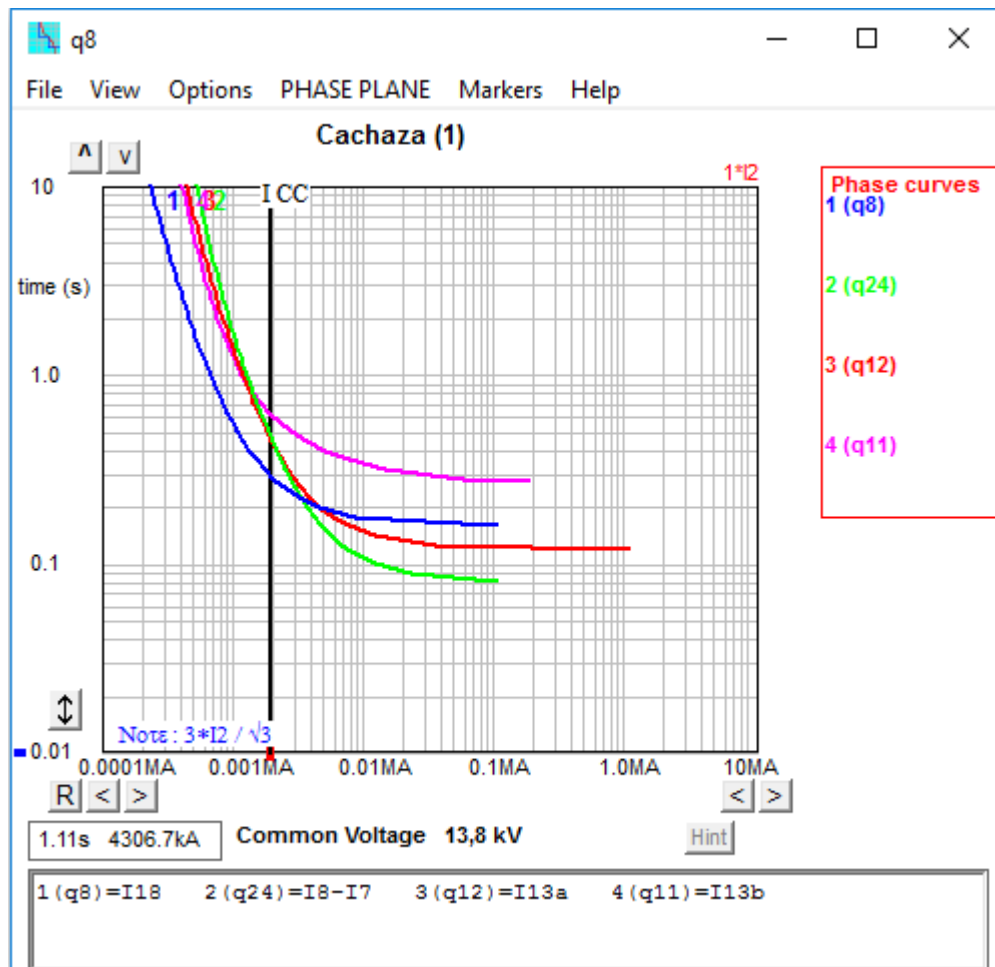
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 18. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra calderas 4 y 5**



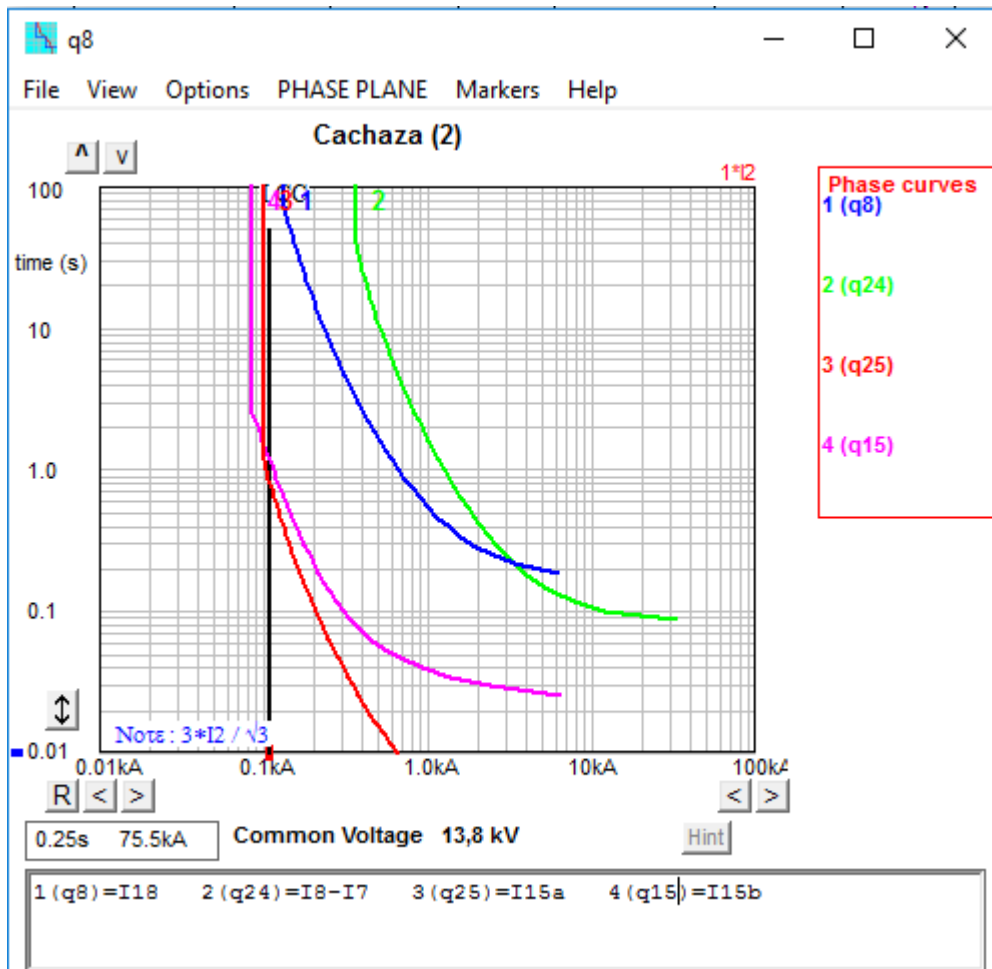
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 19. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra cachaza**



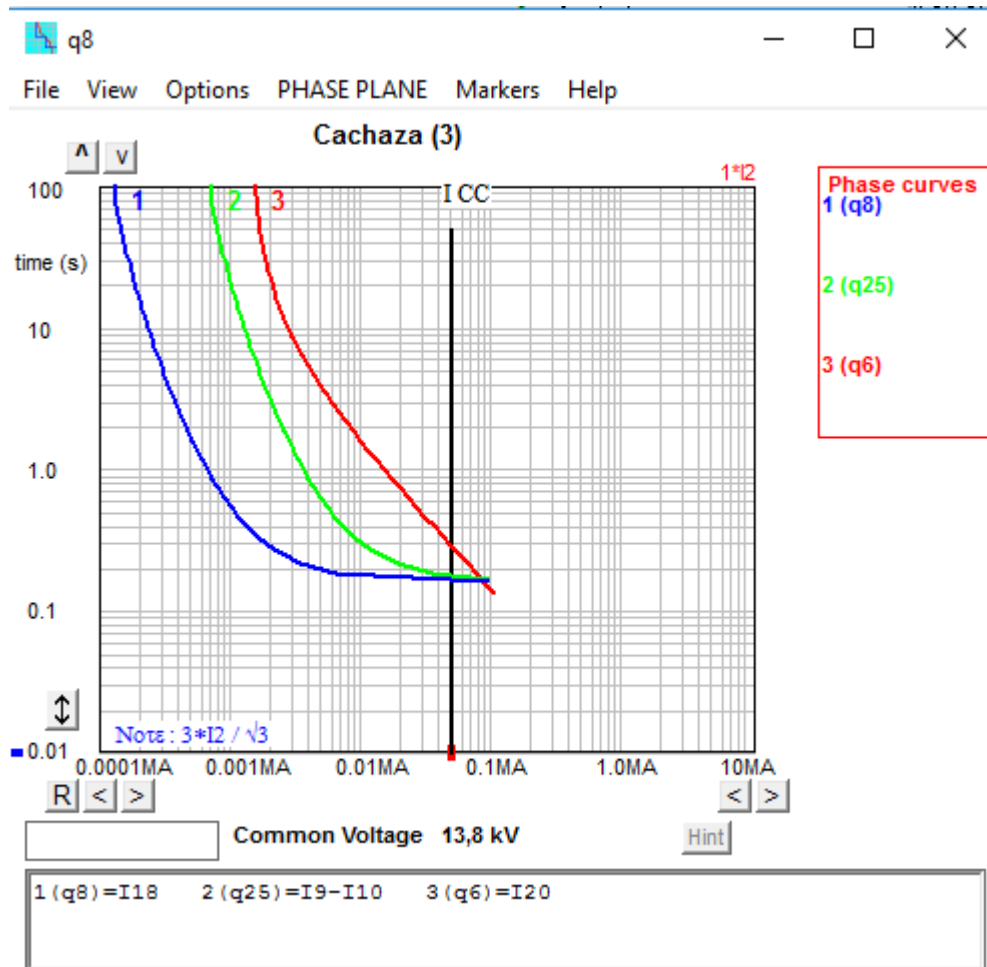
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 20. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra cachaza**



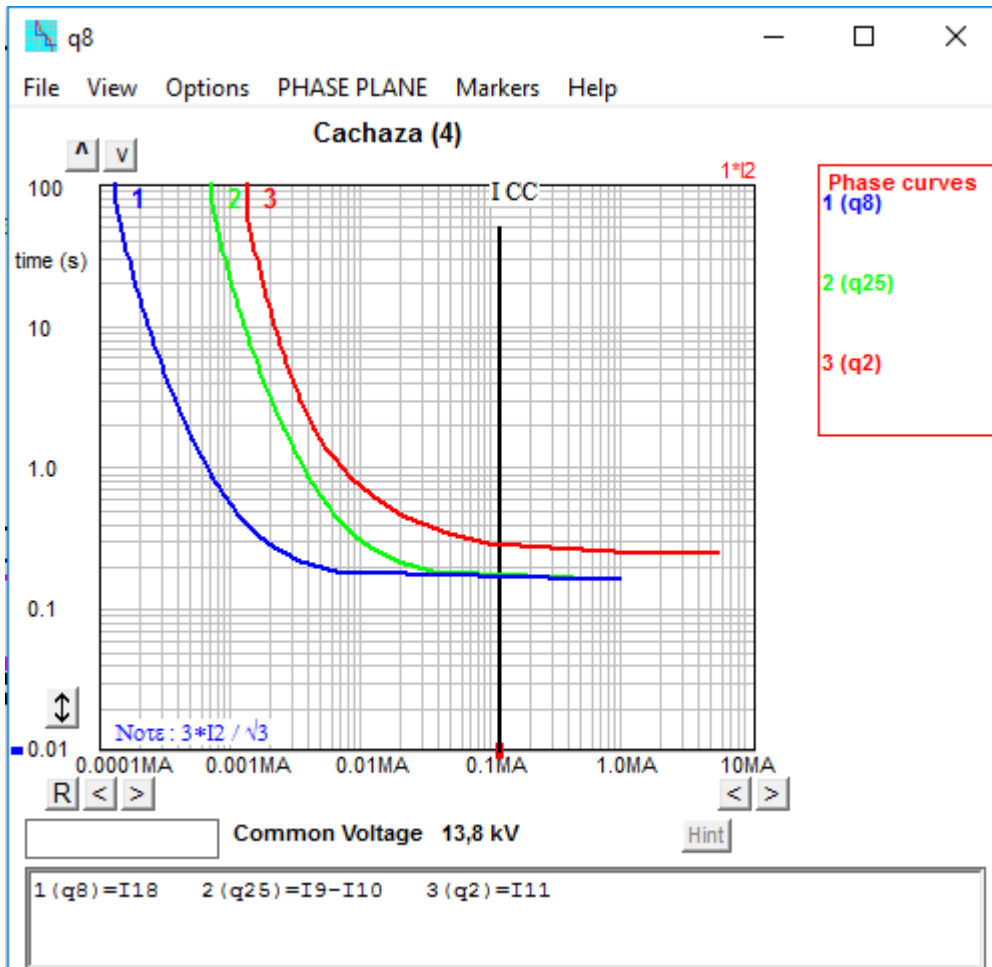
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 21. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra cachaza**



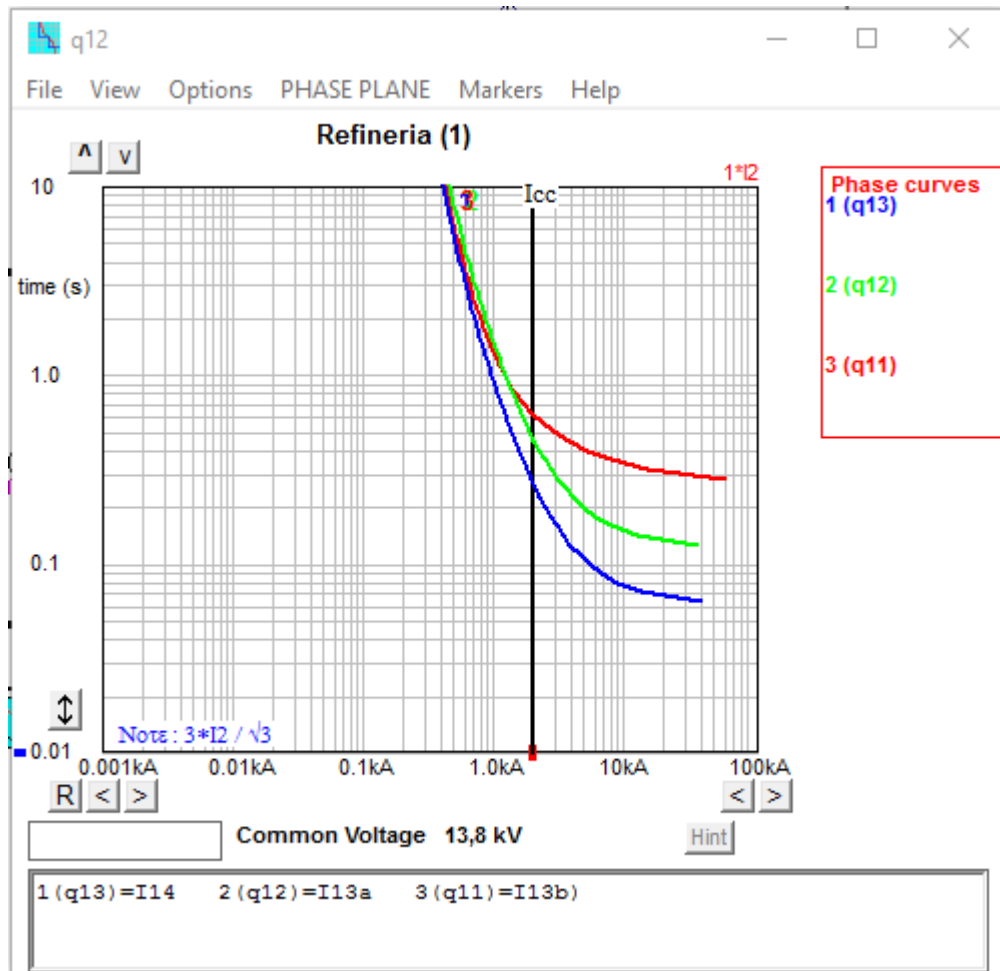
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 22. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra cachaza**



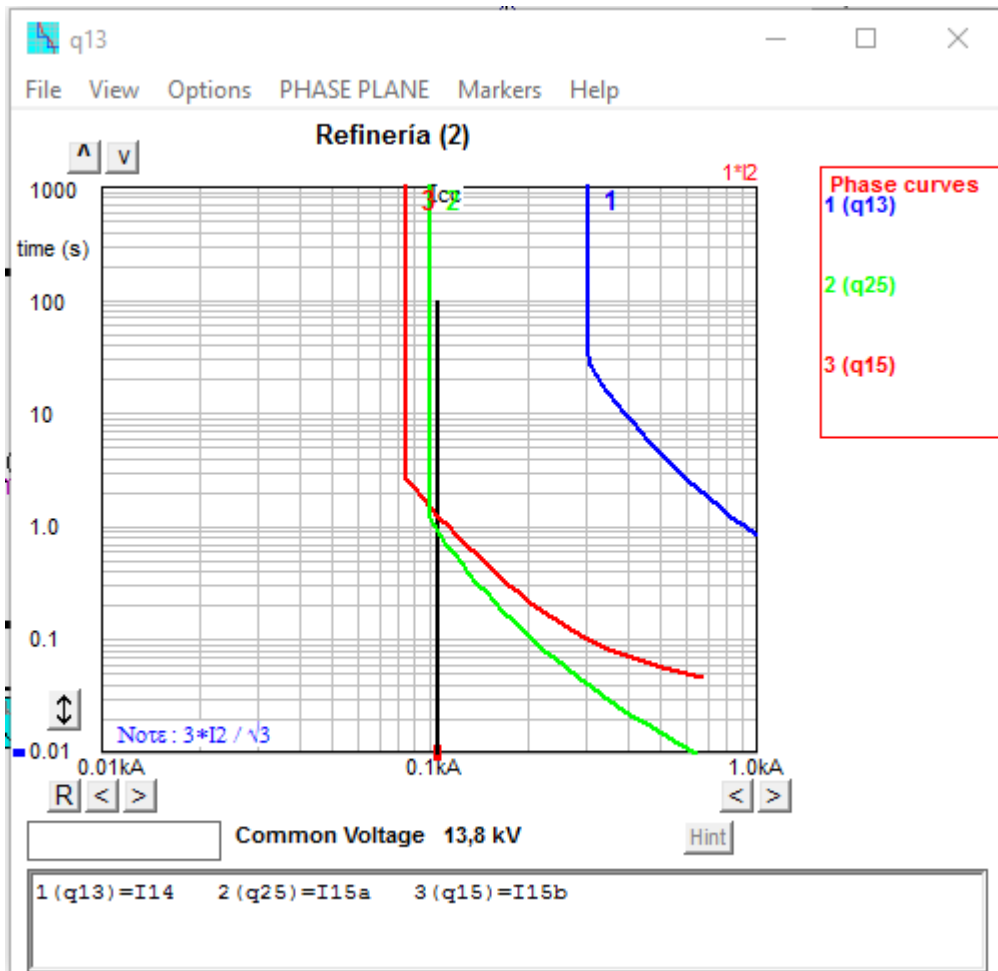
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 23. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Refinería**



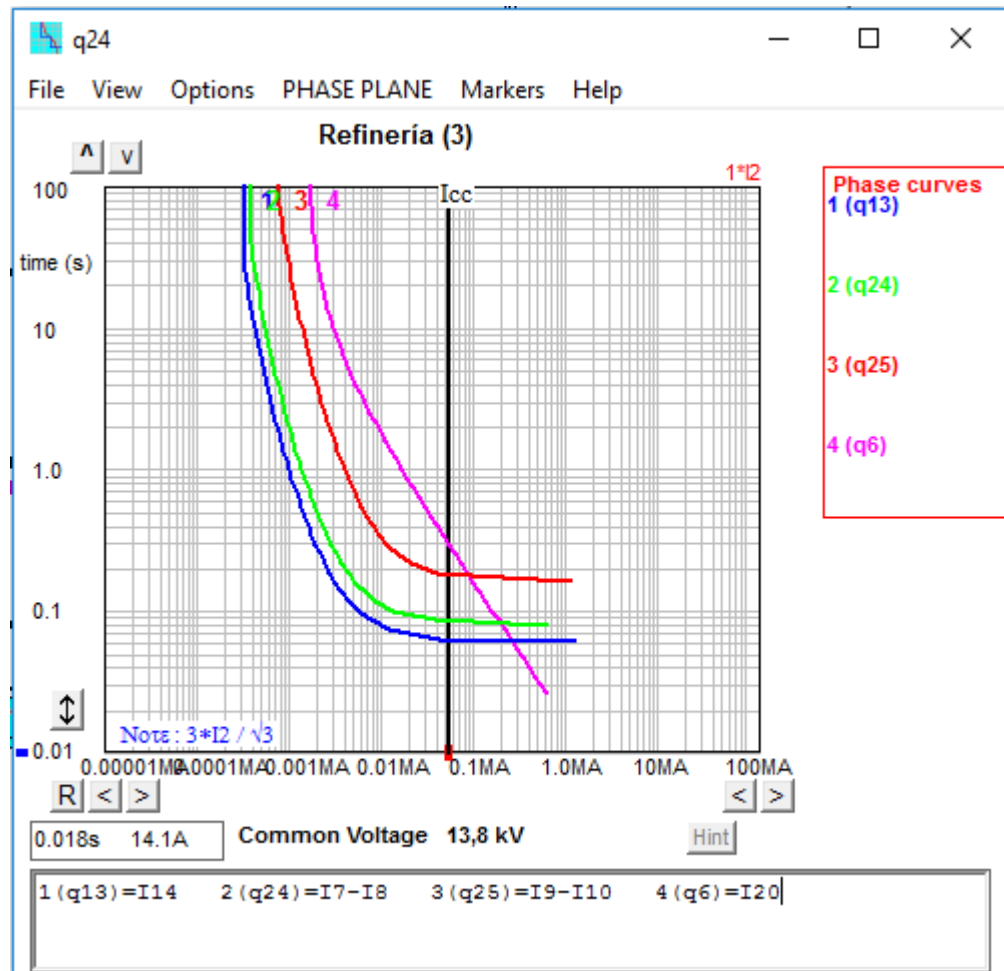
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 24. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Refinería**



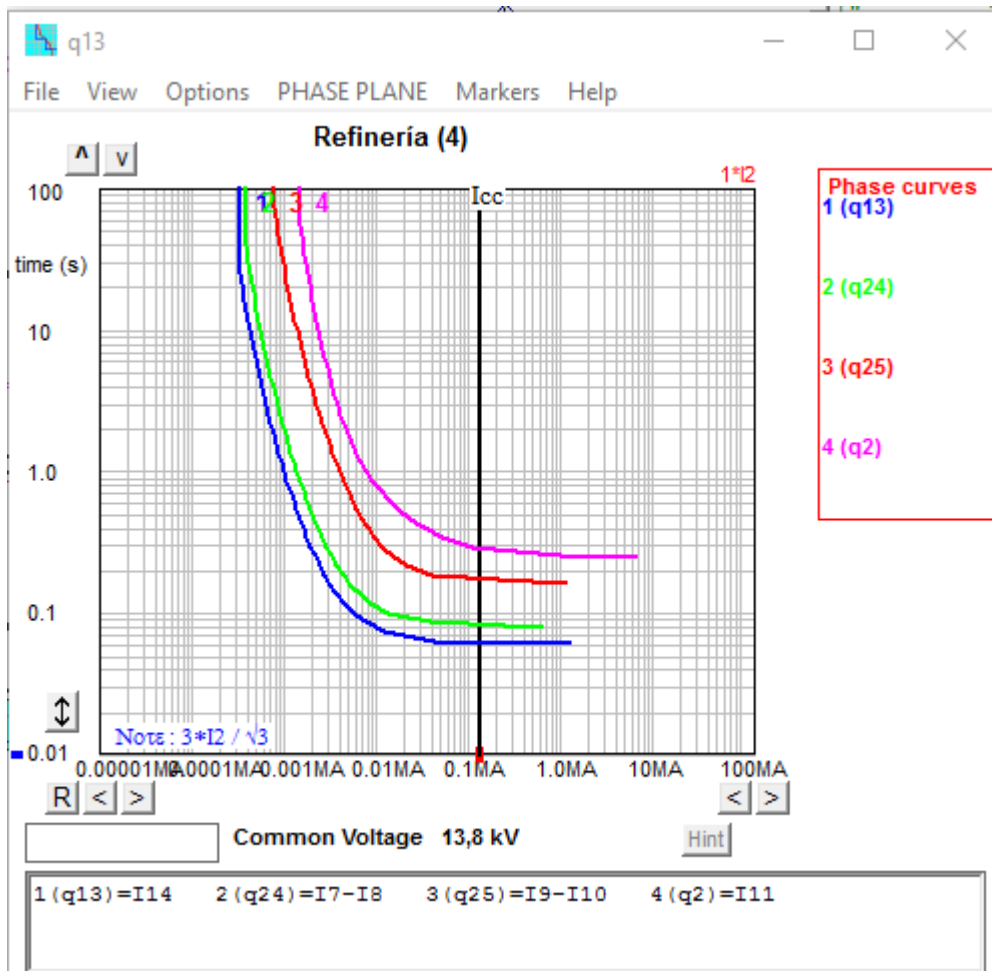
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 25. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Refinería**



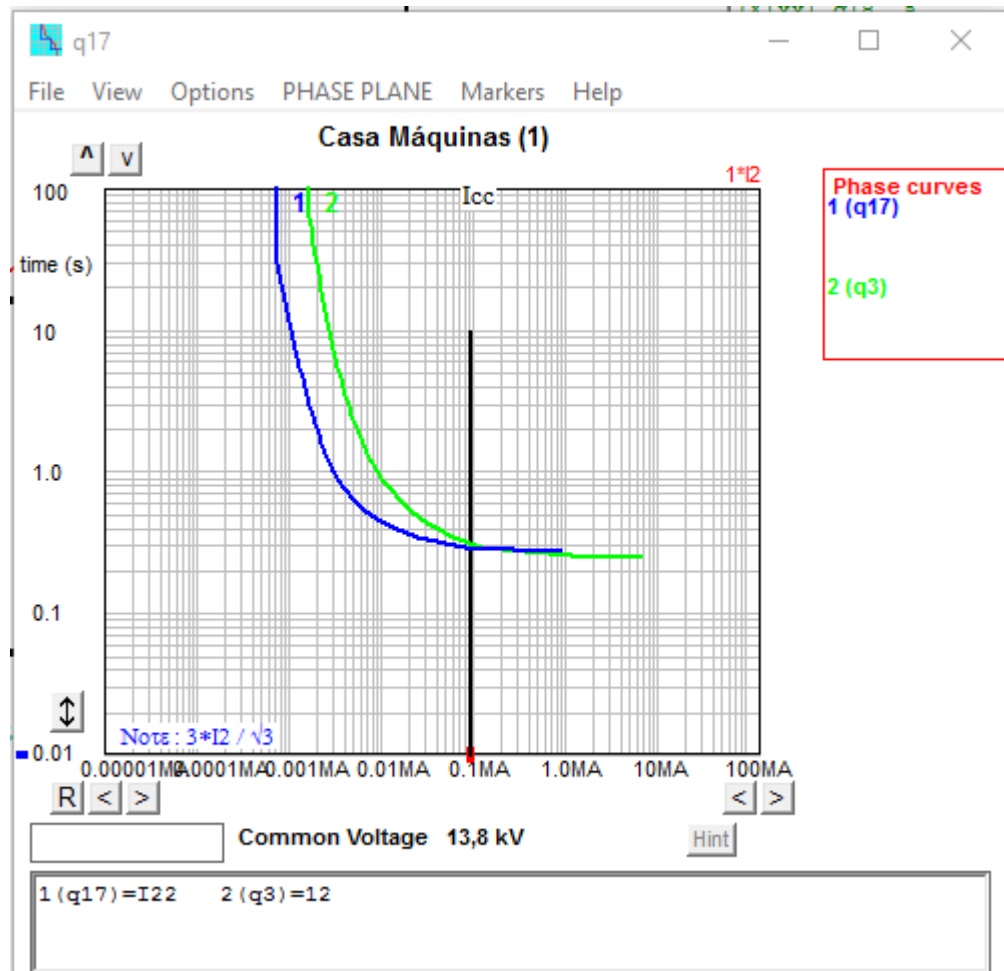
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 26. **Corrientes en los Ct's al simular un cortocircuito en la barra Torre Enfriamiento**



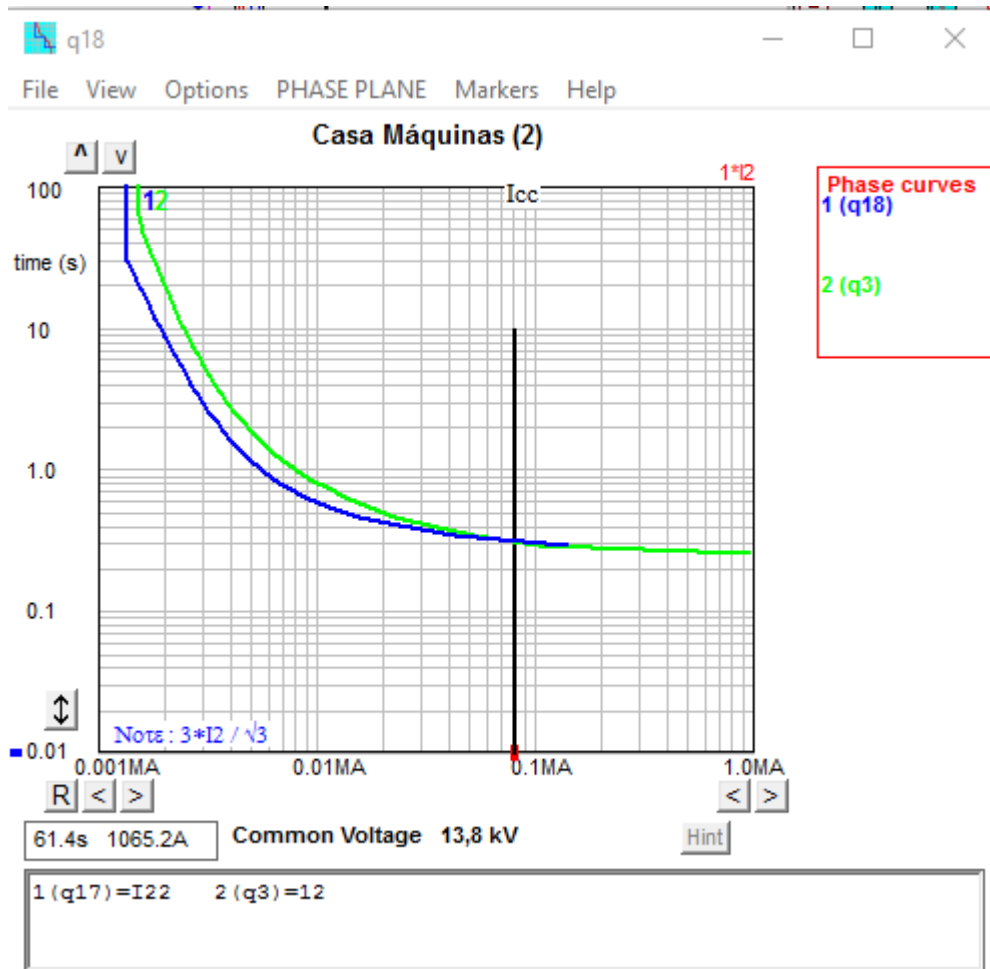
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 27. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Casa Máquinas**



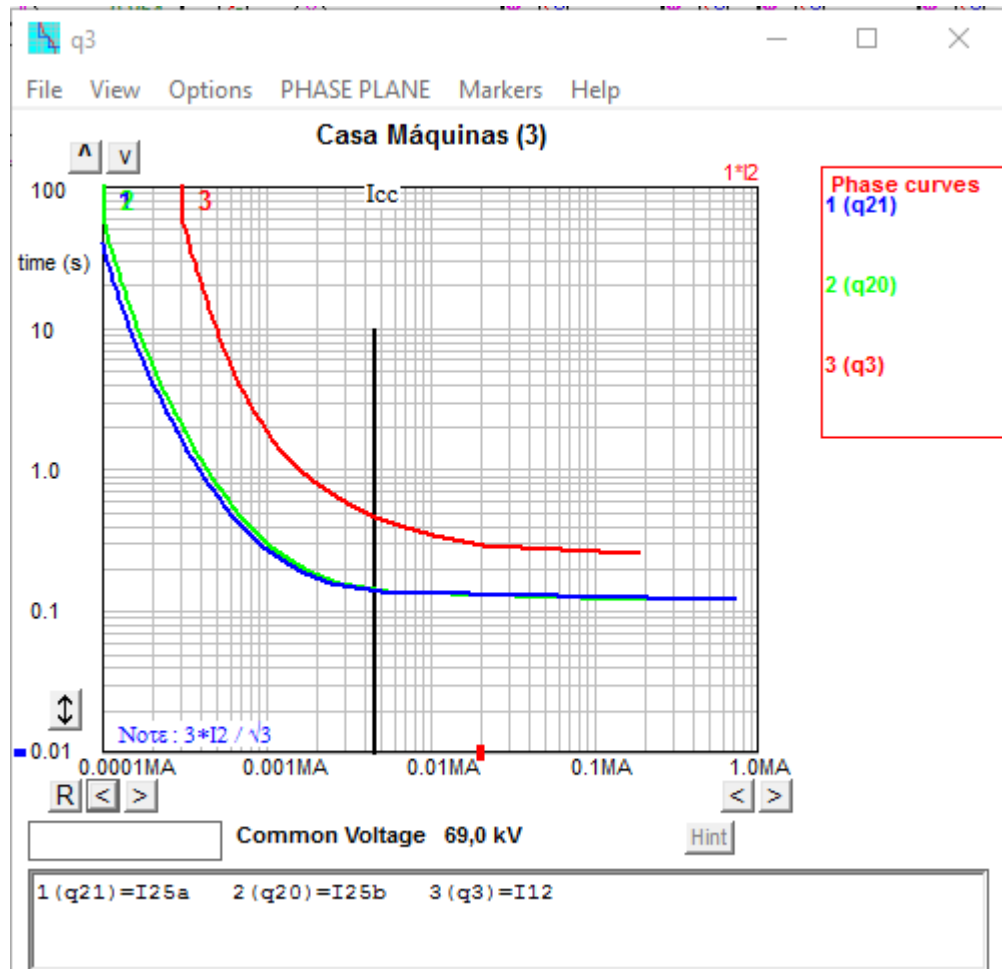
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 28. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Casa Máquinas**



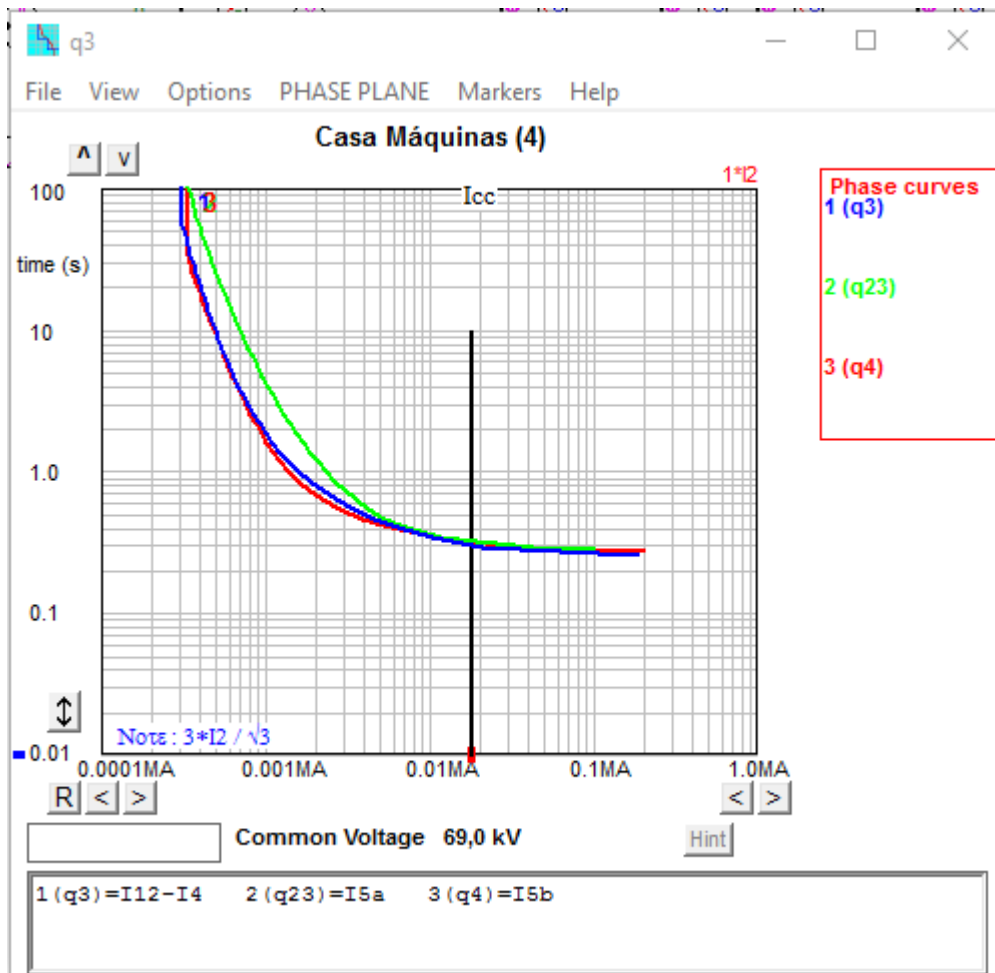
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 29. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Casa Máquinas**



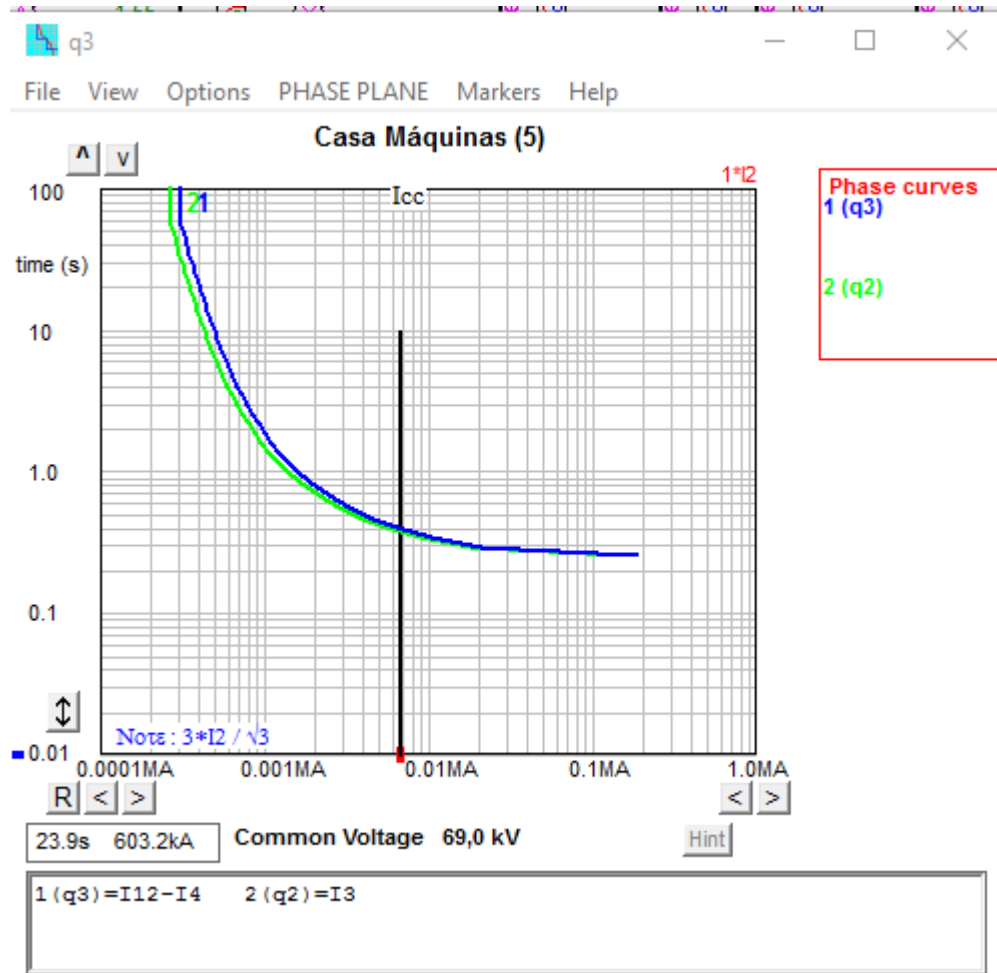
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 30. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Casa Máquinas**



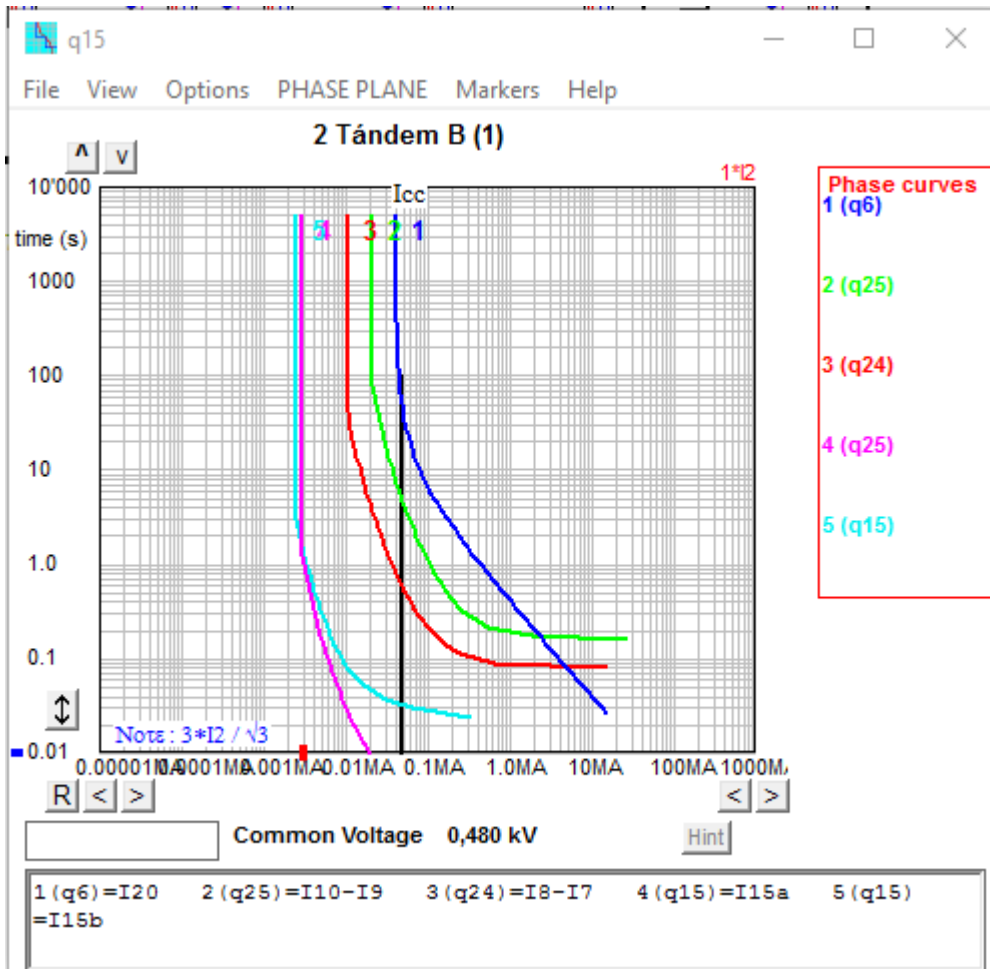
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 31. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Casa Máquinas**



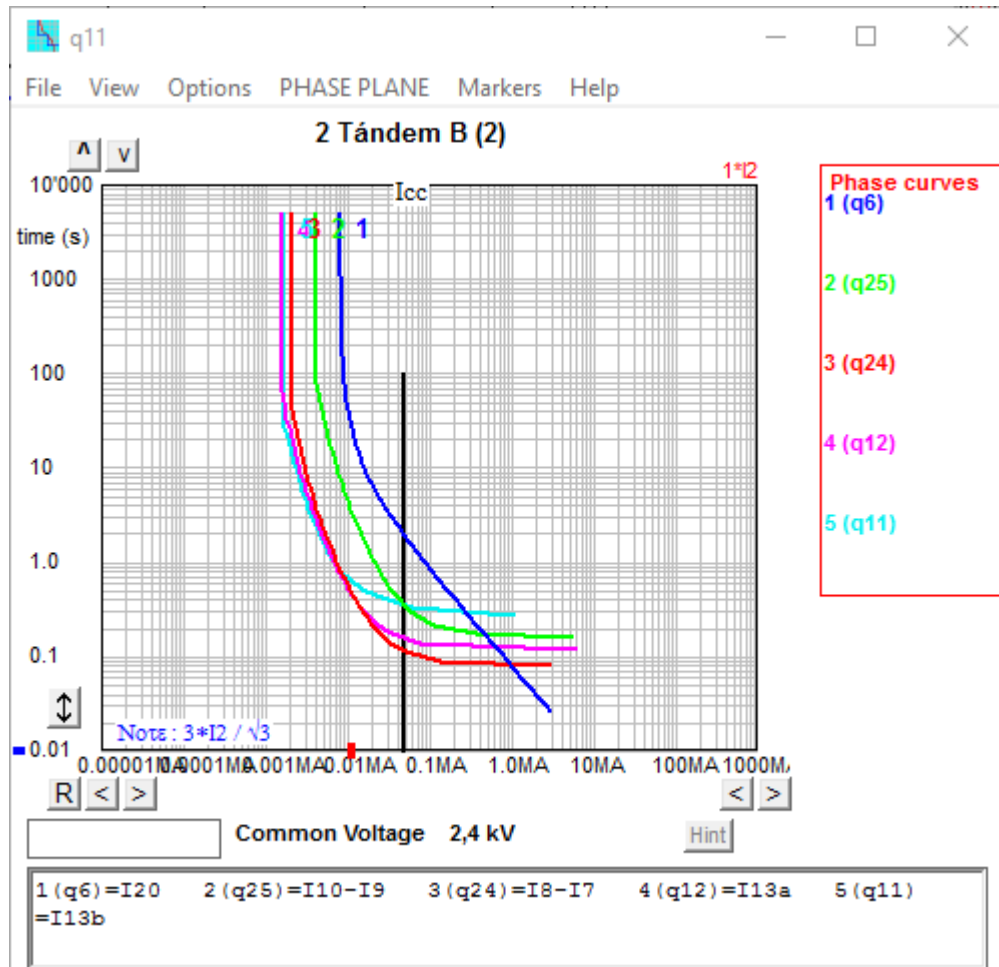
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 32. **Corrientes en los Ct's al simular un cortocircuito en la barra Torre Enfriamiento**



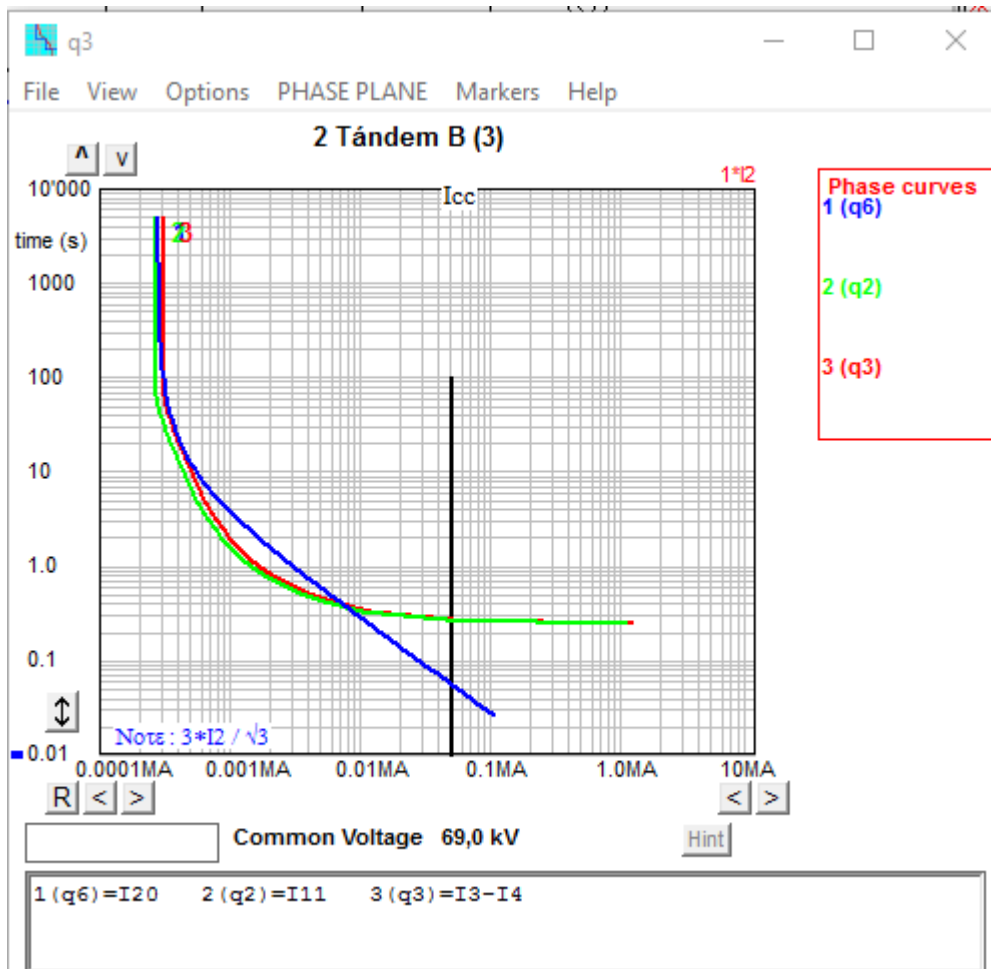
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 33. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra 2 Tándem B**



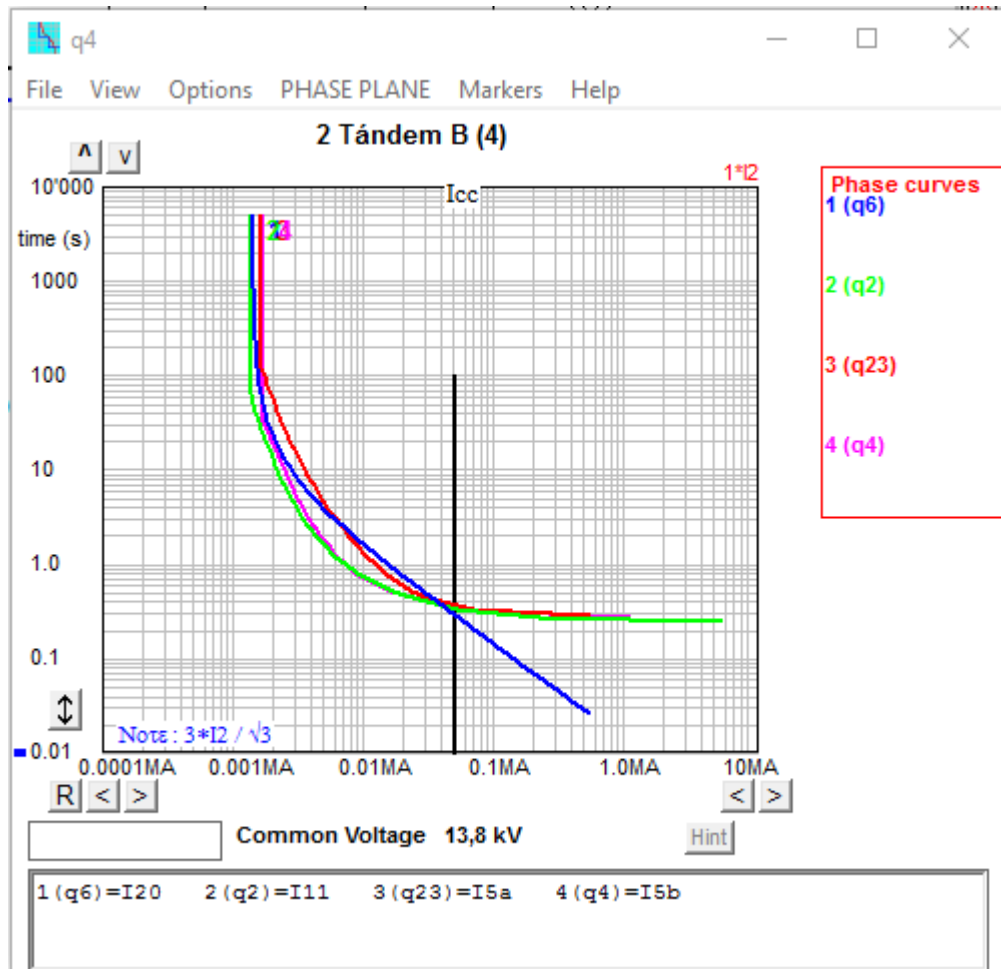
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 34. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra 2 Tándem B**



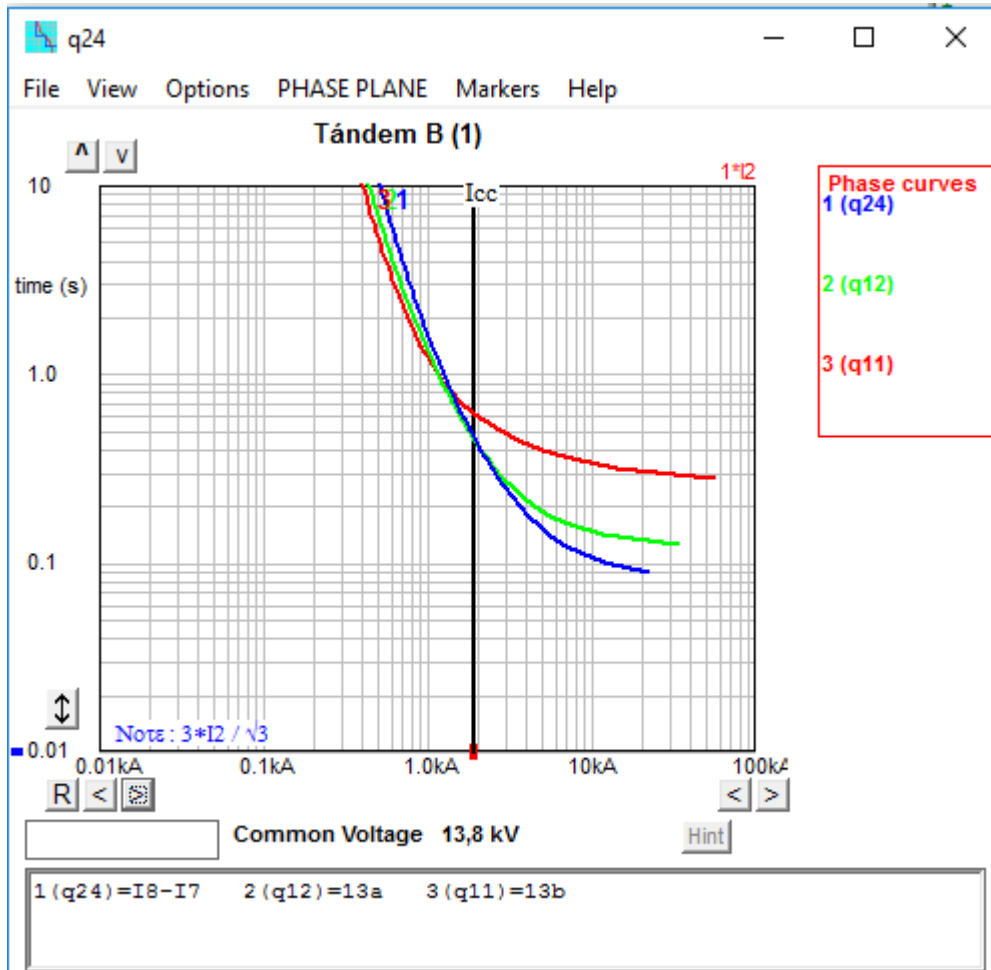
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 35. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra 2 Tándem B**



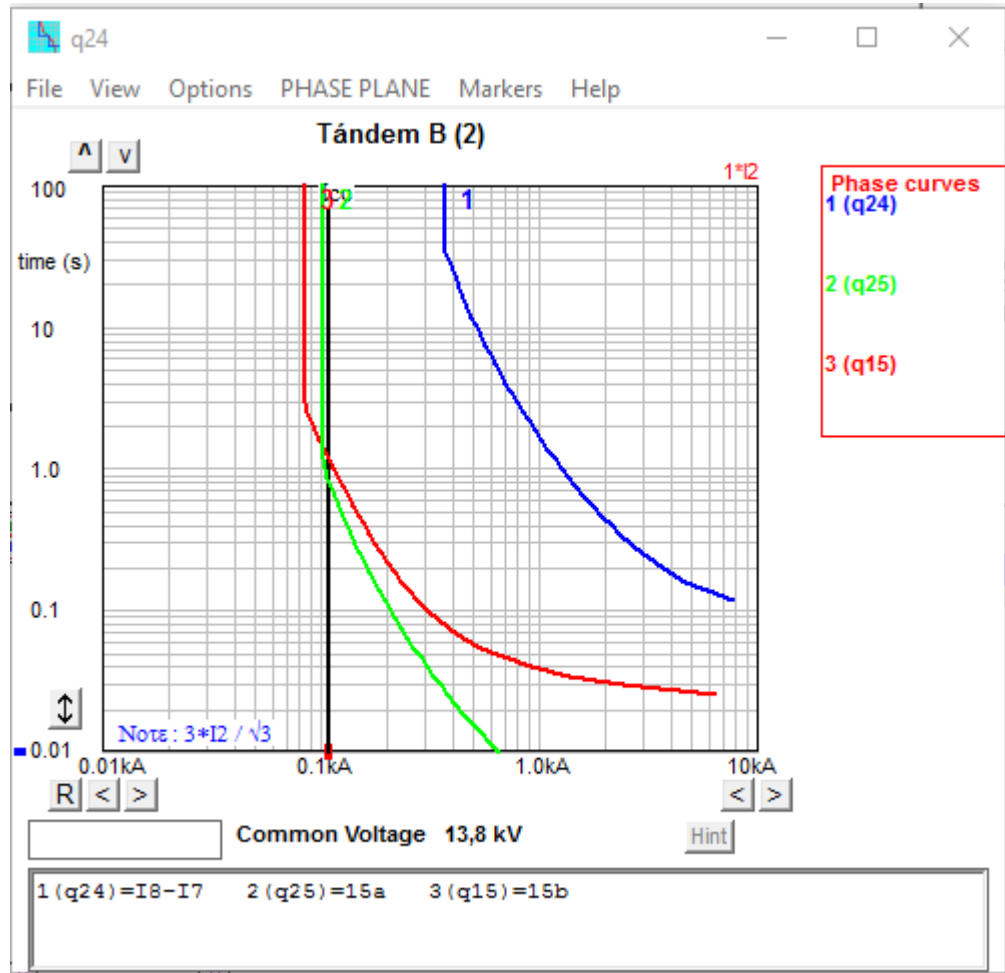
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 36. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Tándem**



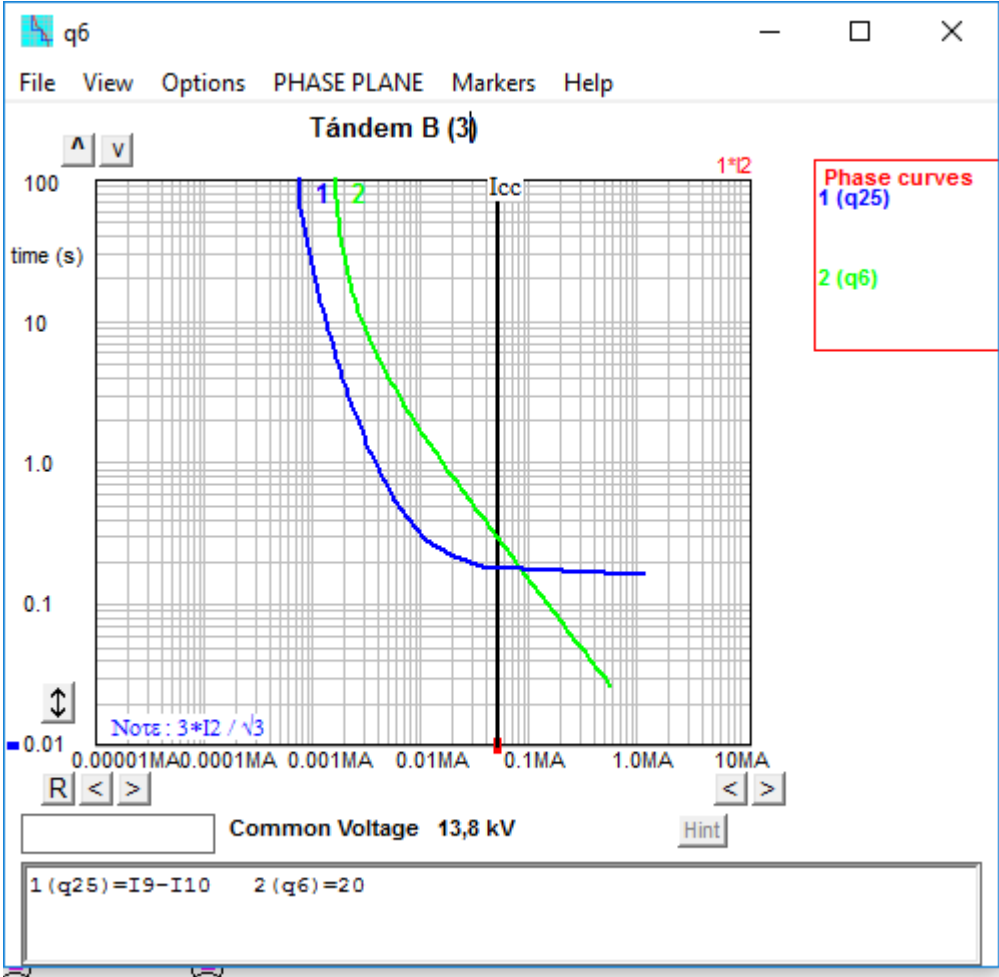
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 37. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Tándem B**



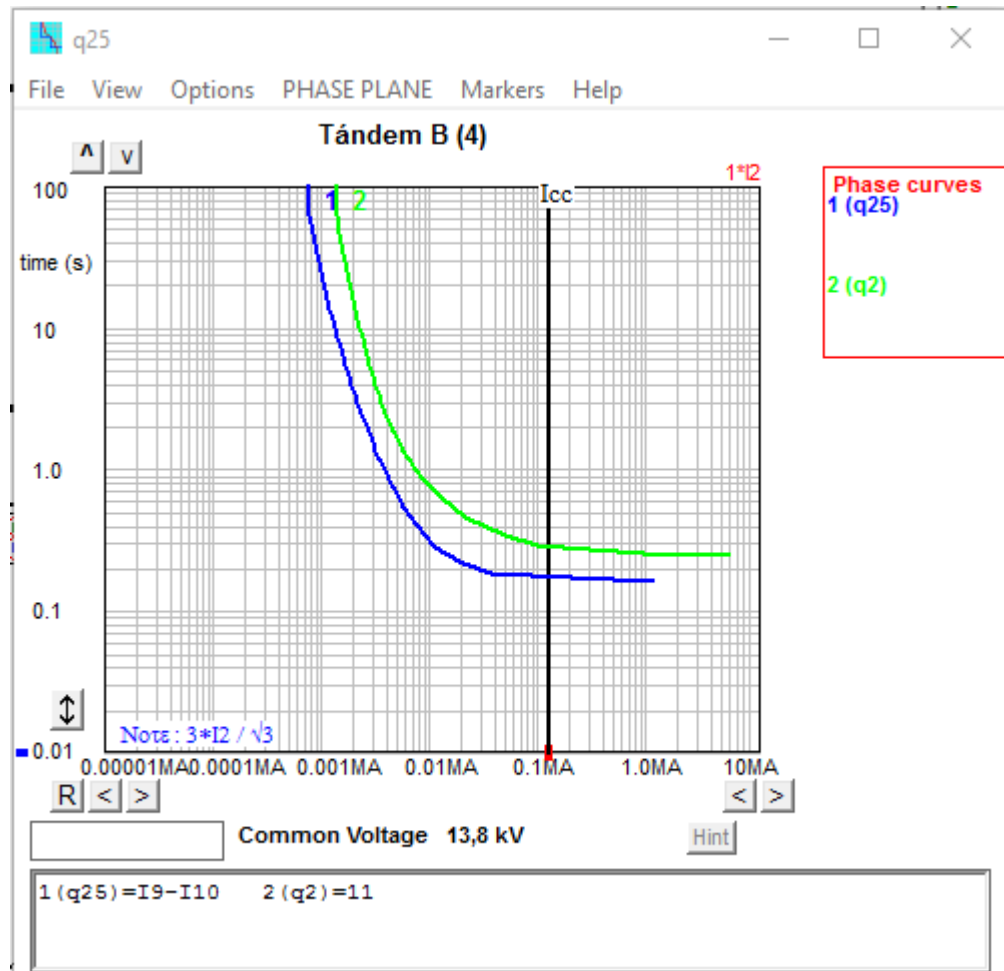
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 38. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Tándem B**



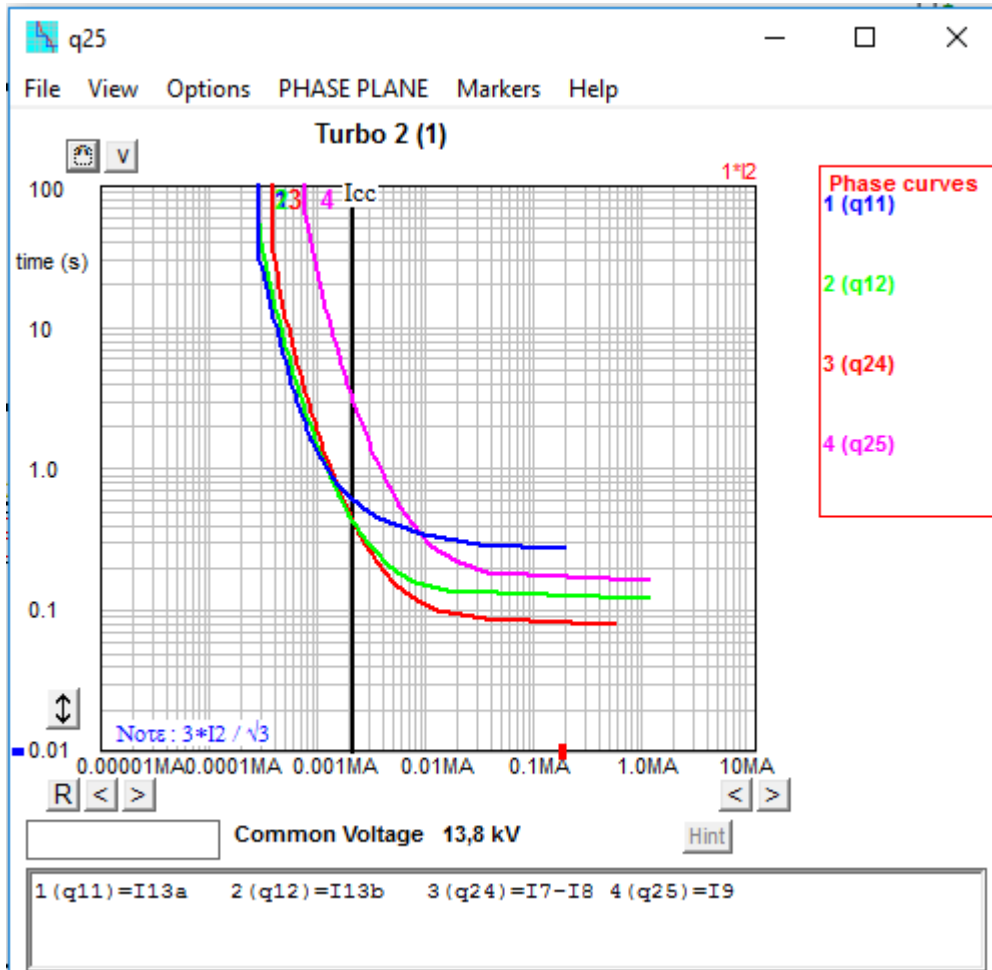
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 39. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Tándem**



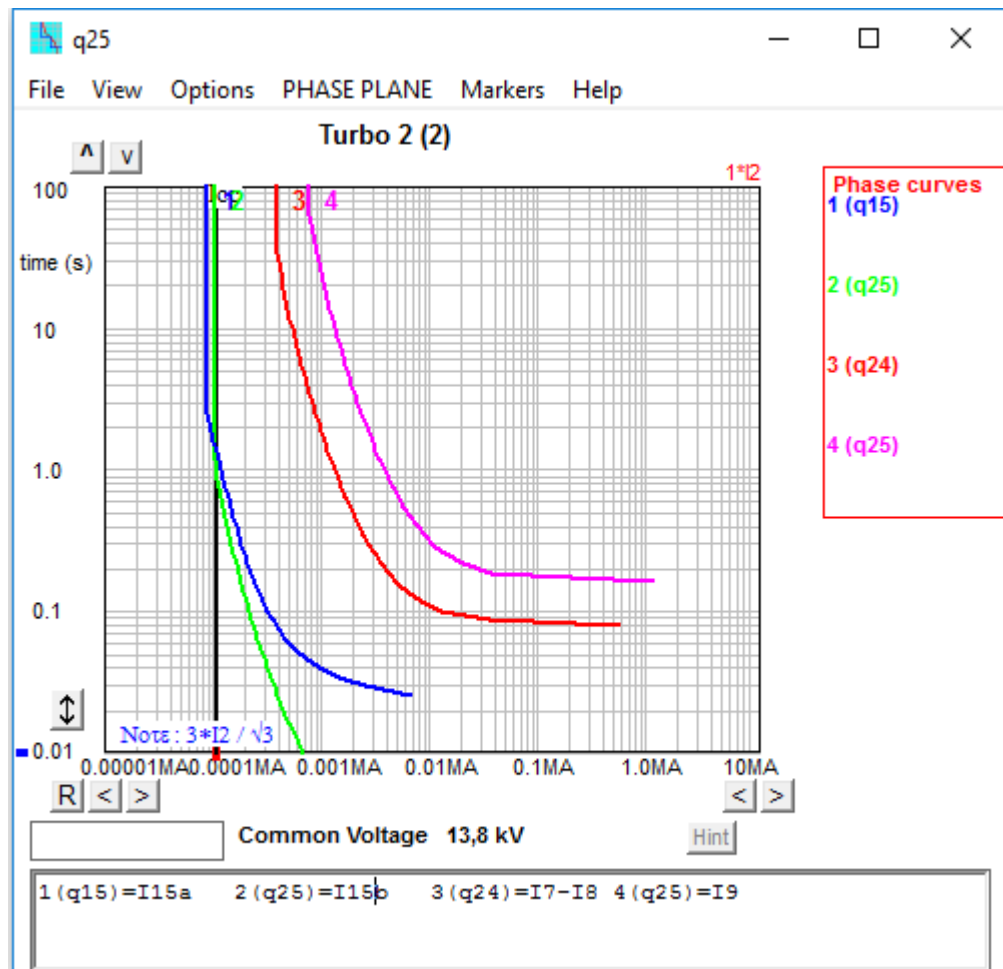
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 40. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Turbo 2**



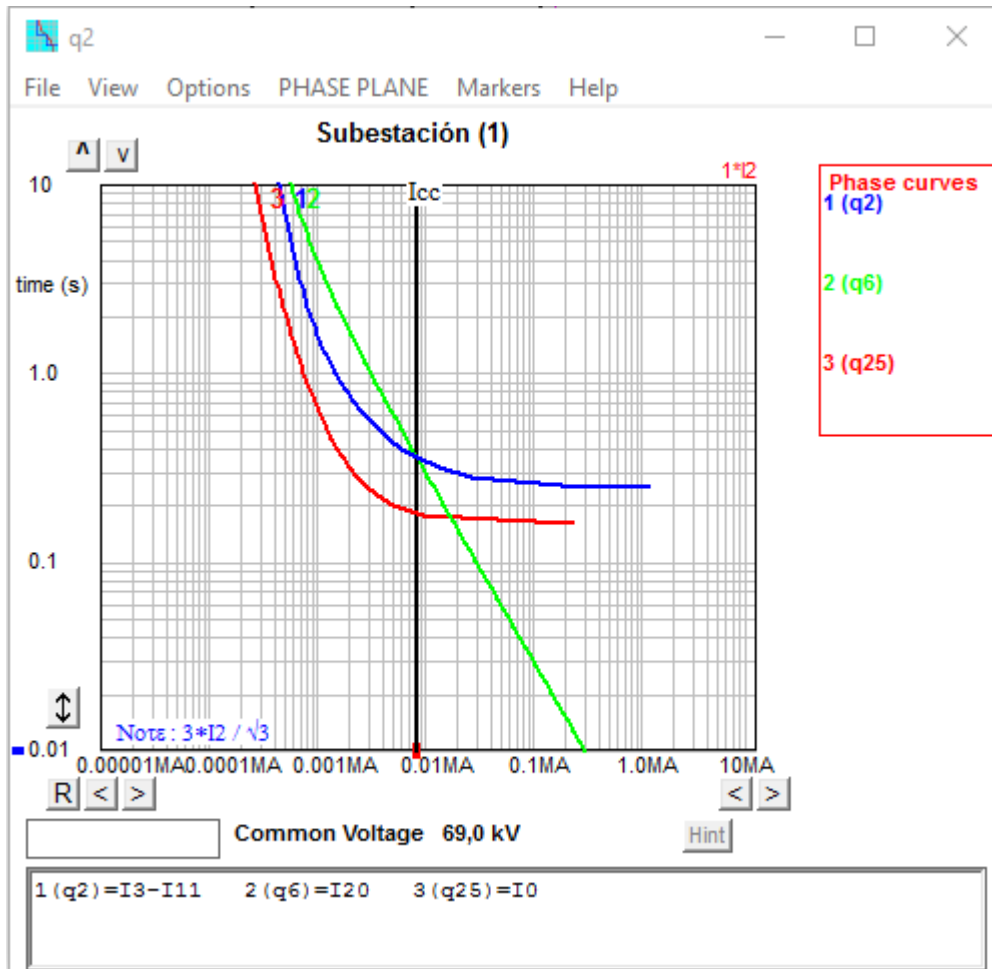
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 41. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Turbo 2**



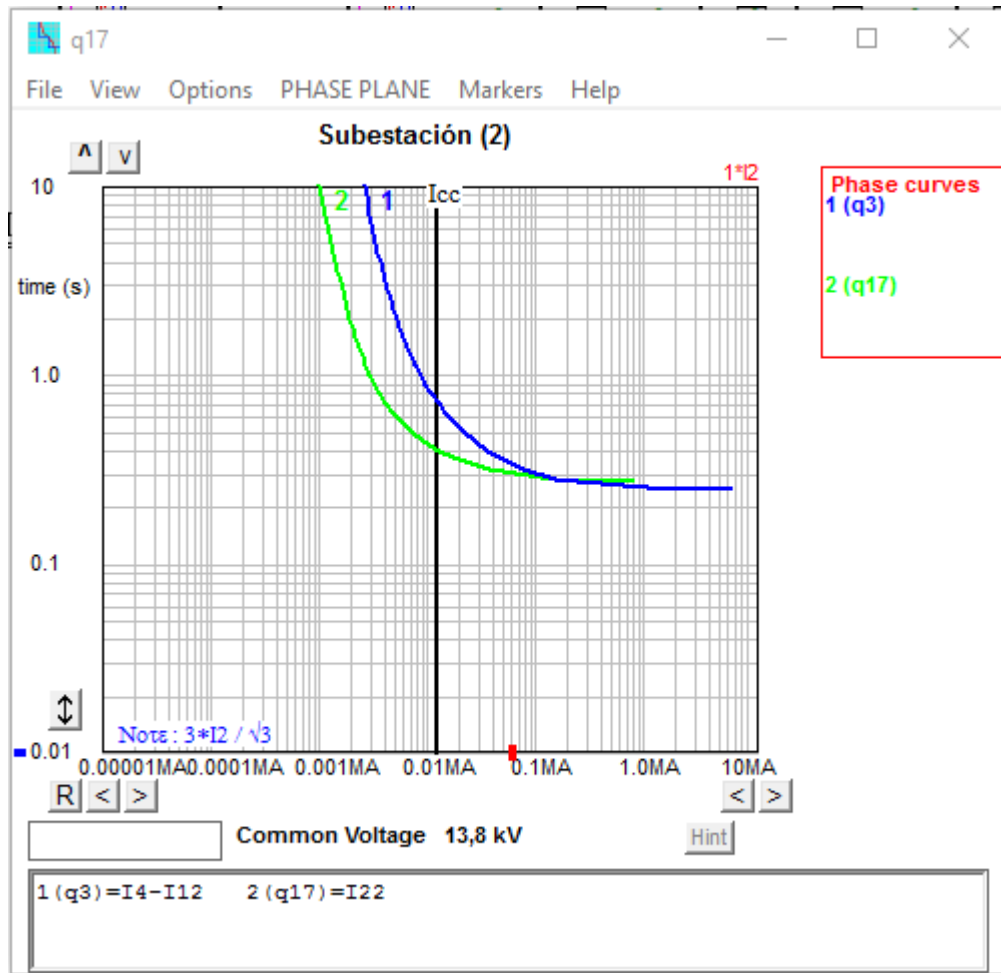
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 42. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



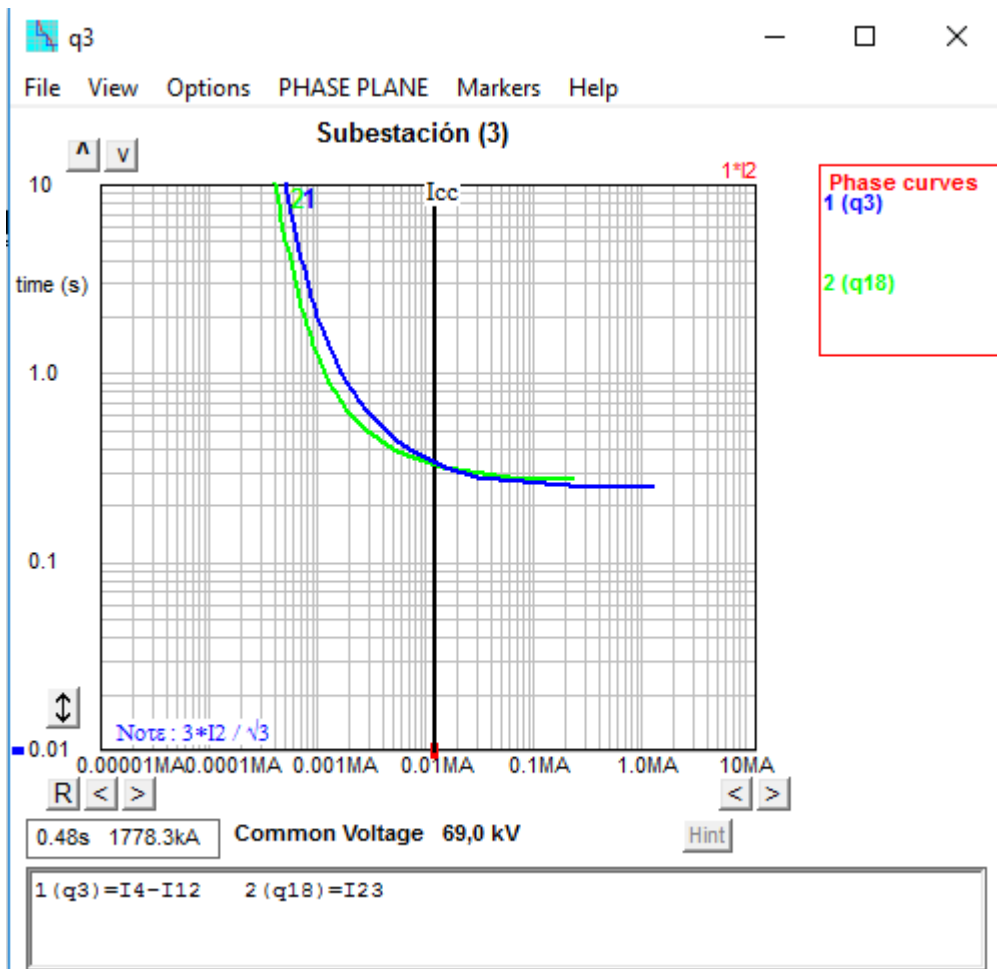
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 43 **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



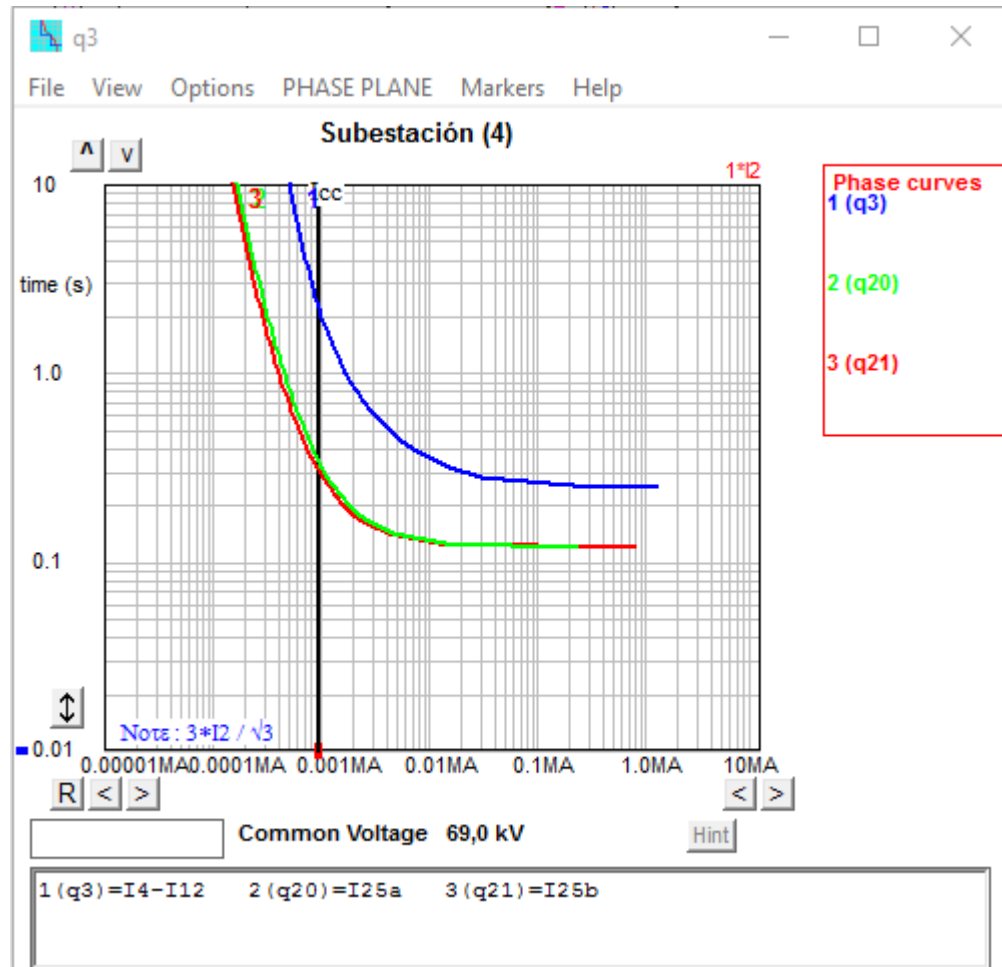
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 44. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la barra Subestación**



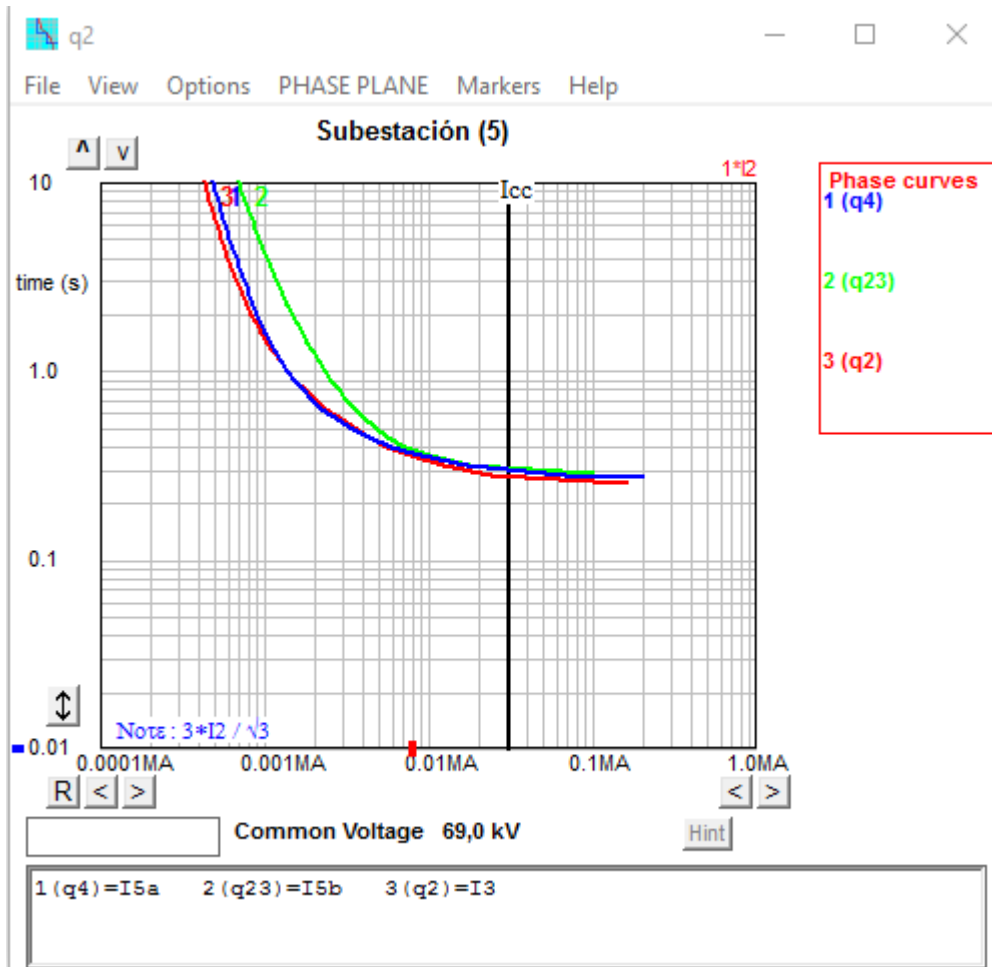
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 45. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



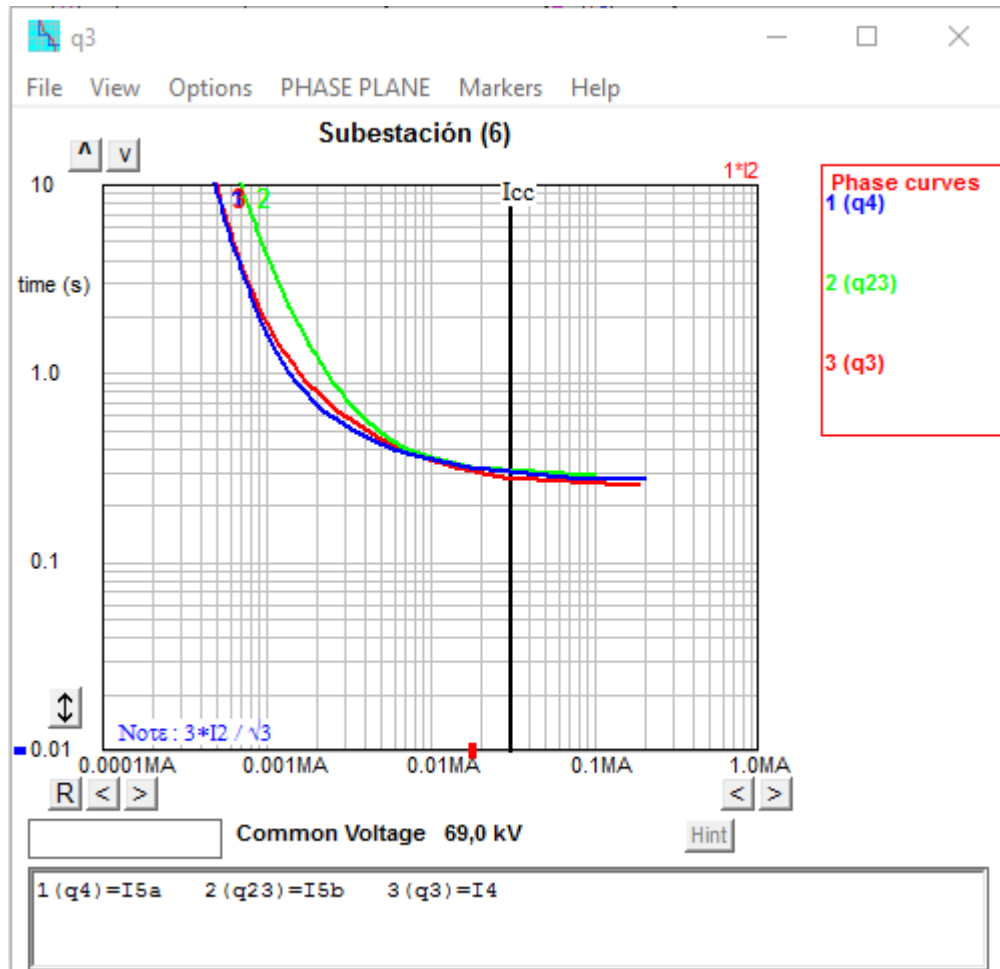
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 46. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



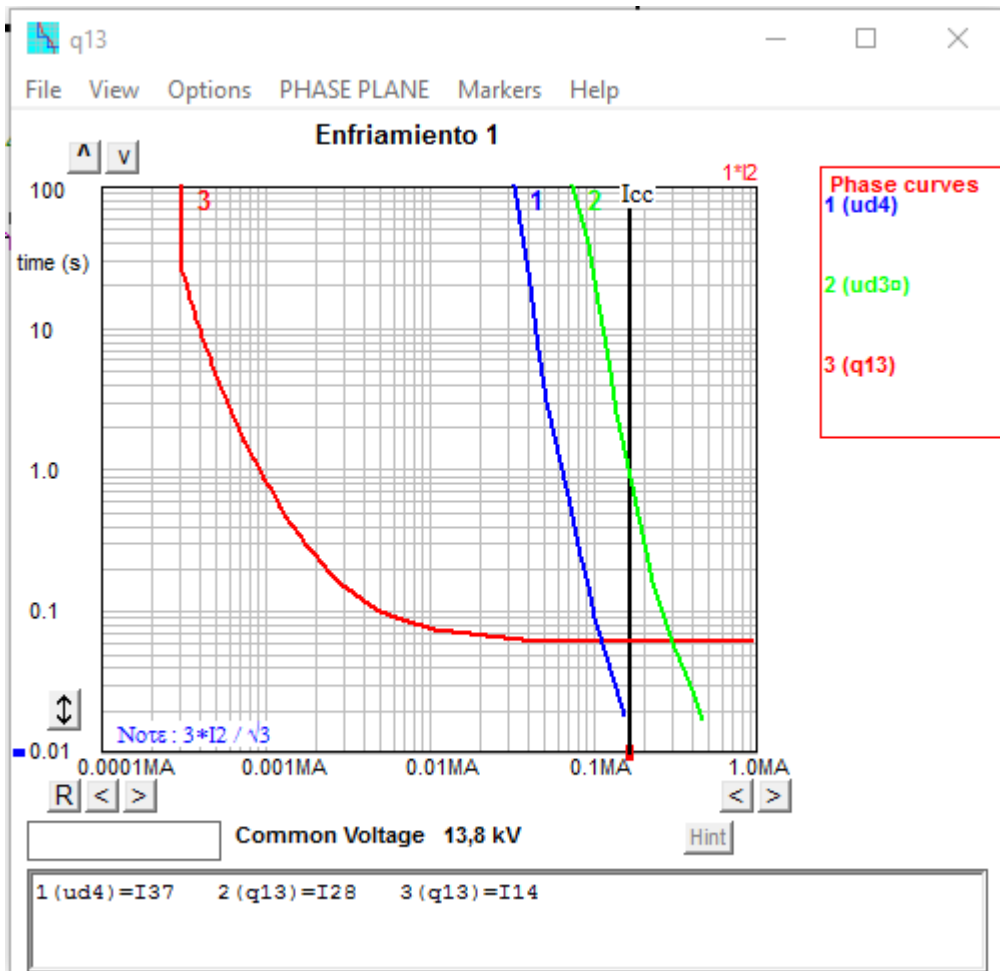
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 47. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la barra Subestación**



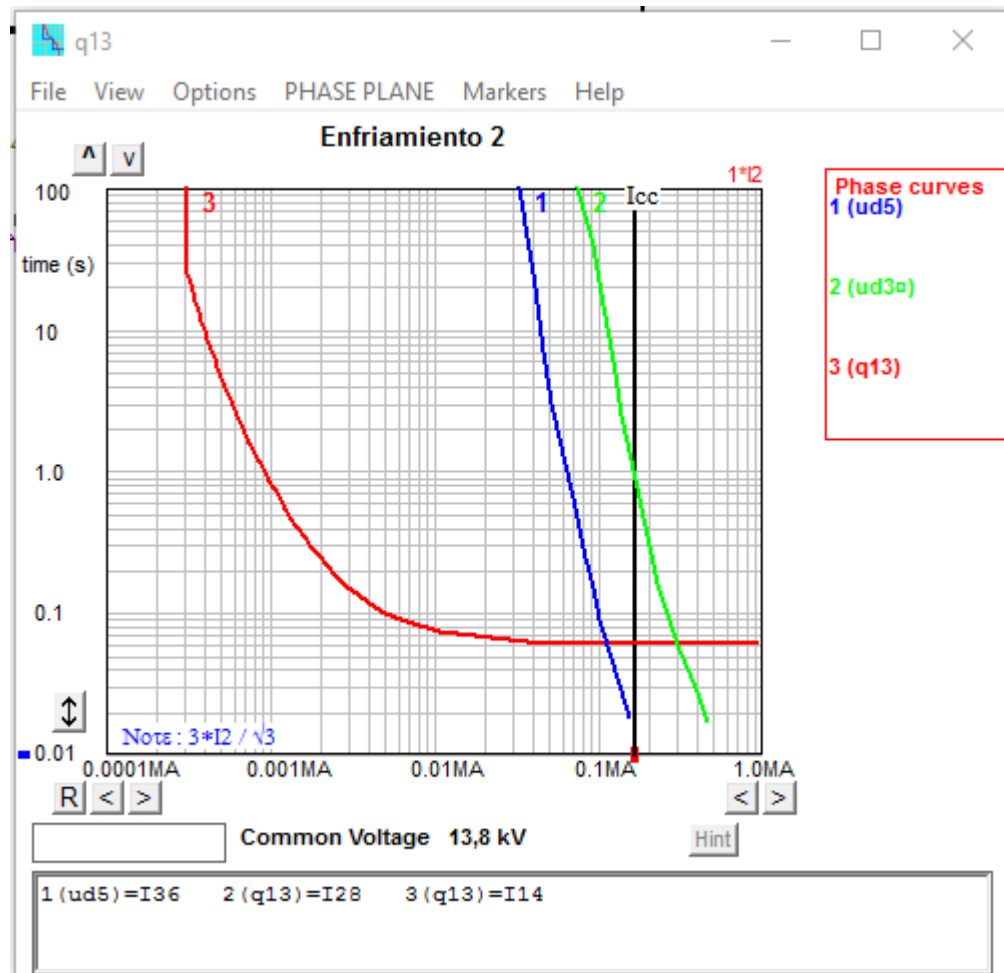
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 48. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Enfriamiento 1**



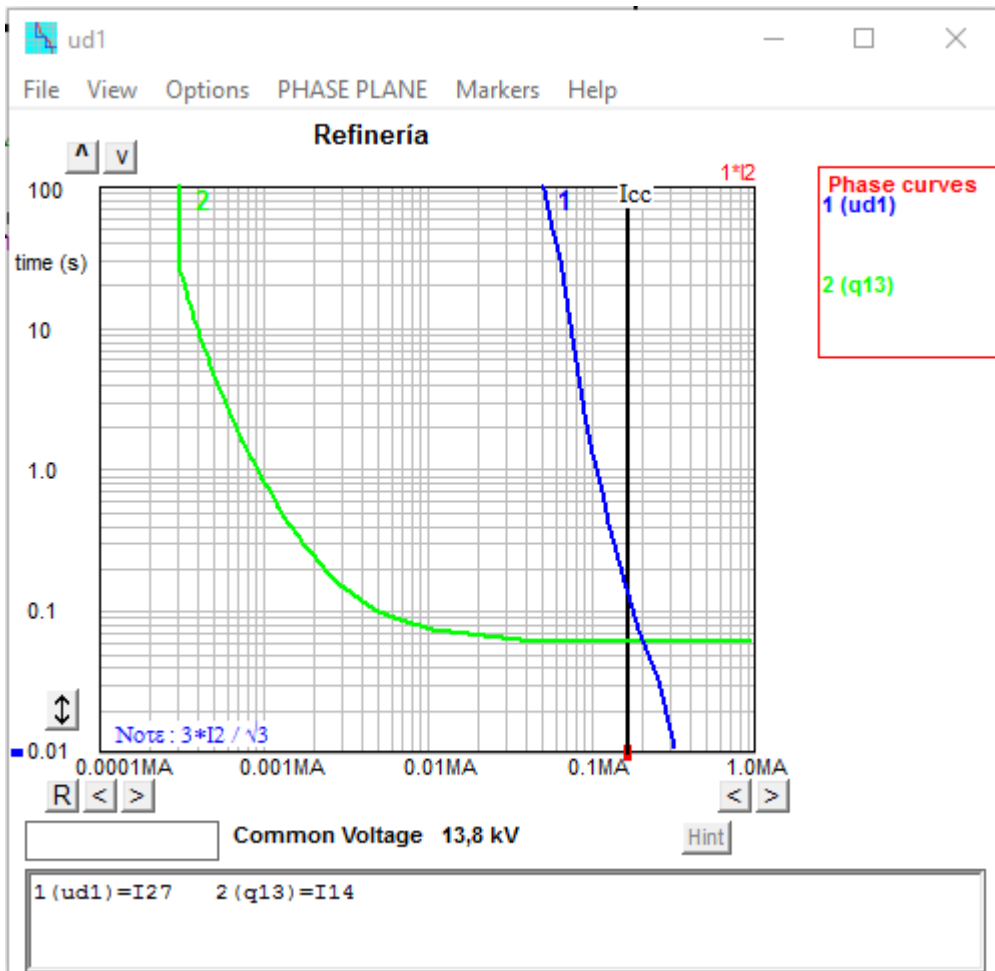
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 49. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Enfriamiento 2**



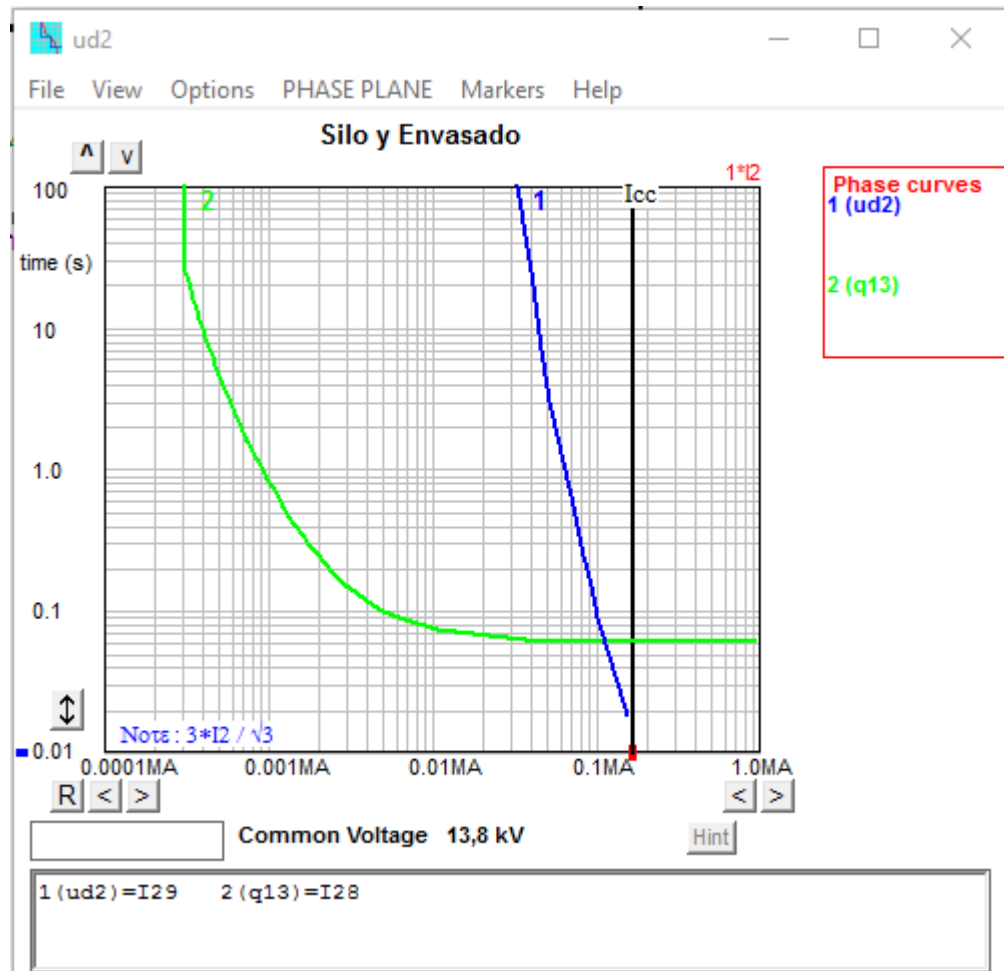
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 50. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Refinería**



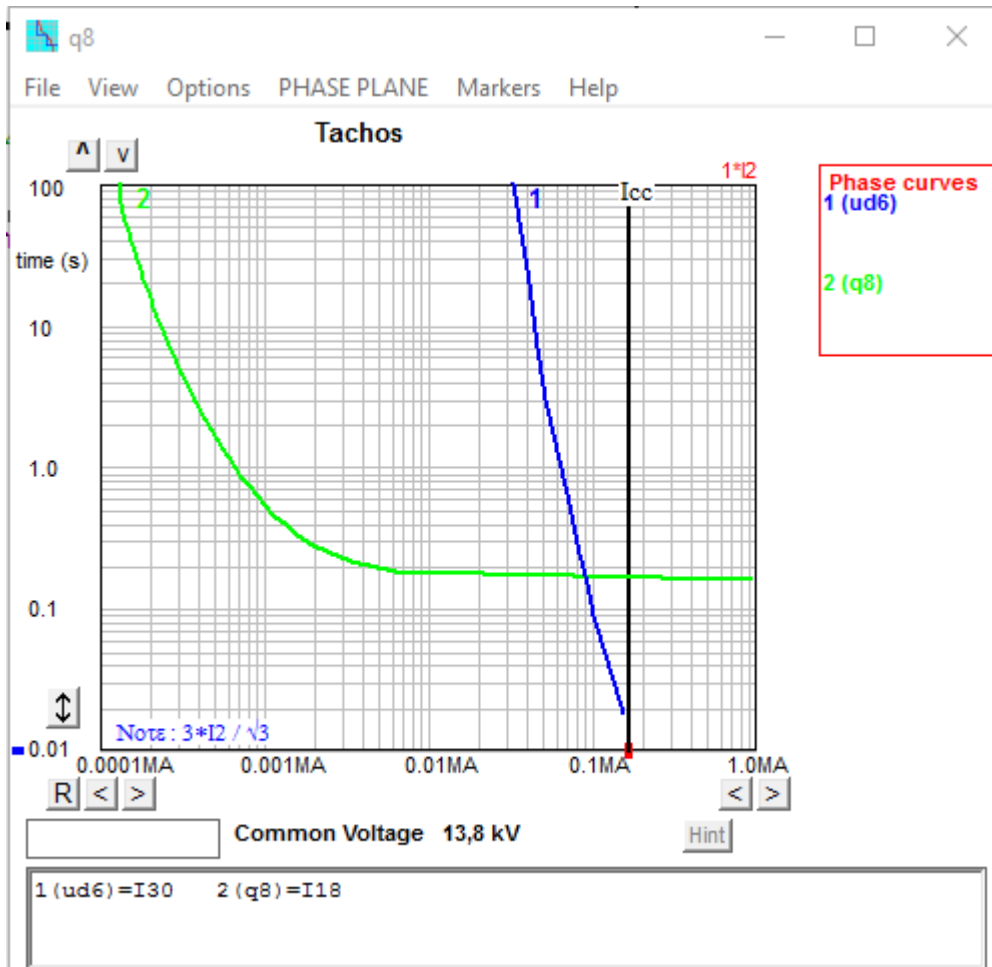
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 51. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Silo y Envasado**



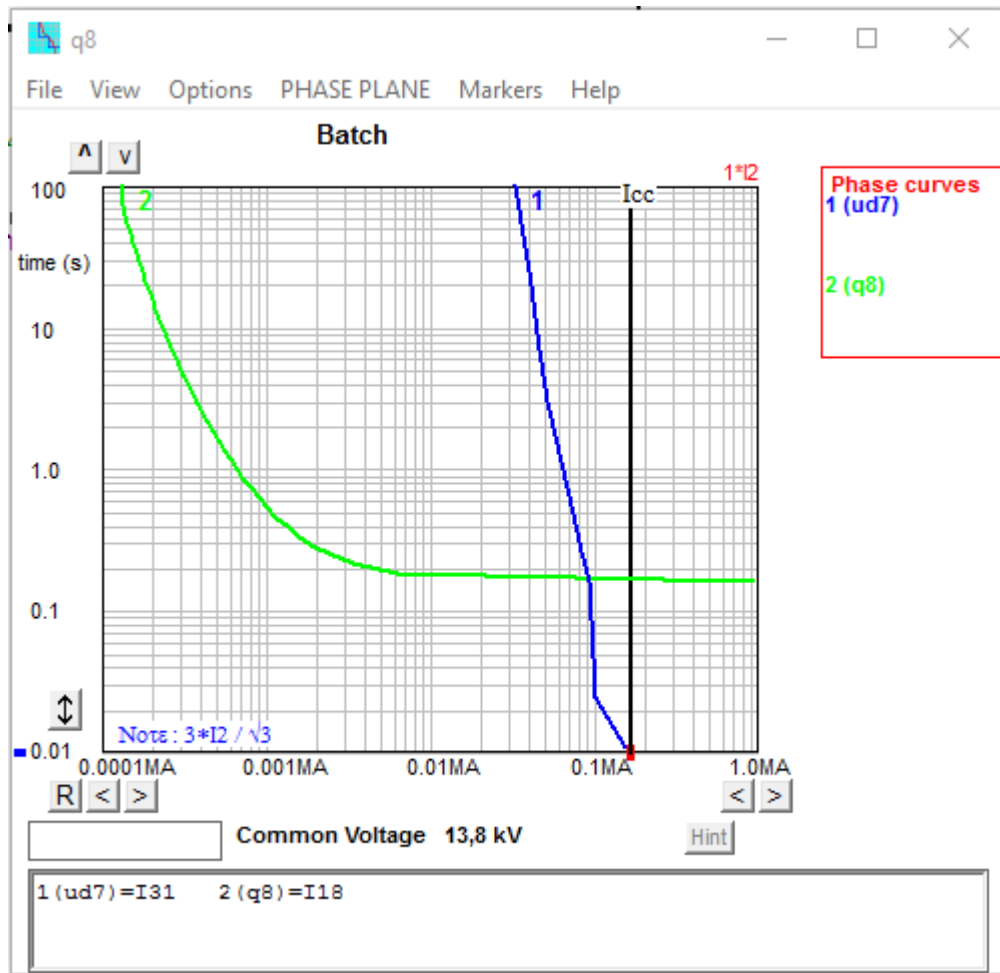
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 52. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Tachos**



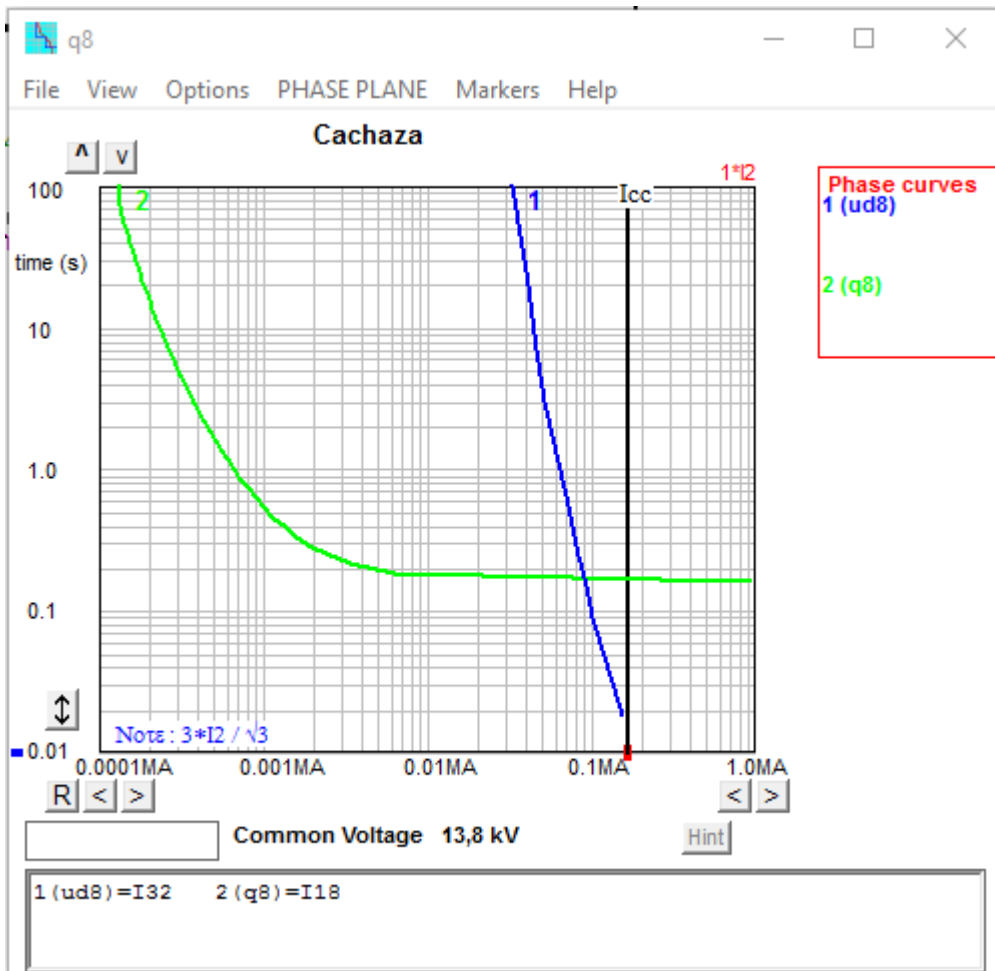
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 53. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Batch**



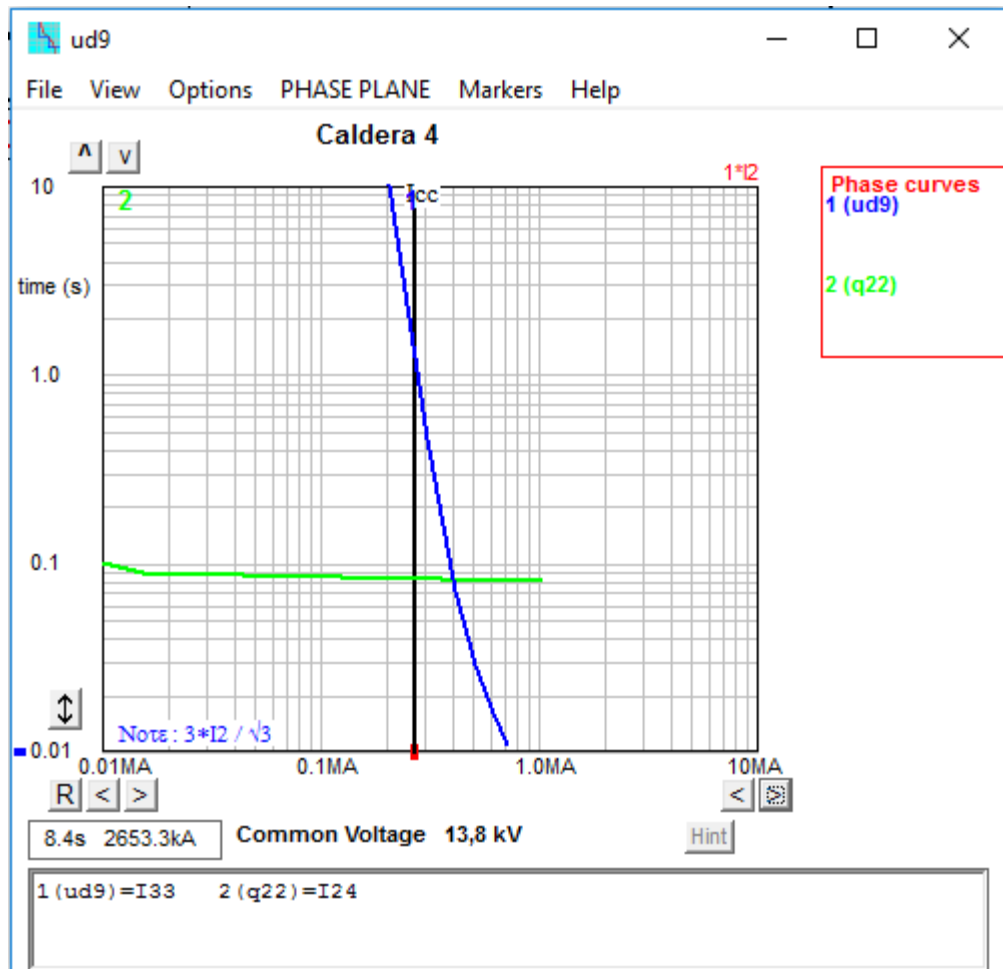
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 54. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Cachaza**



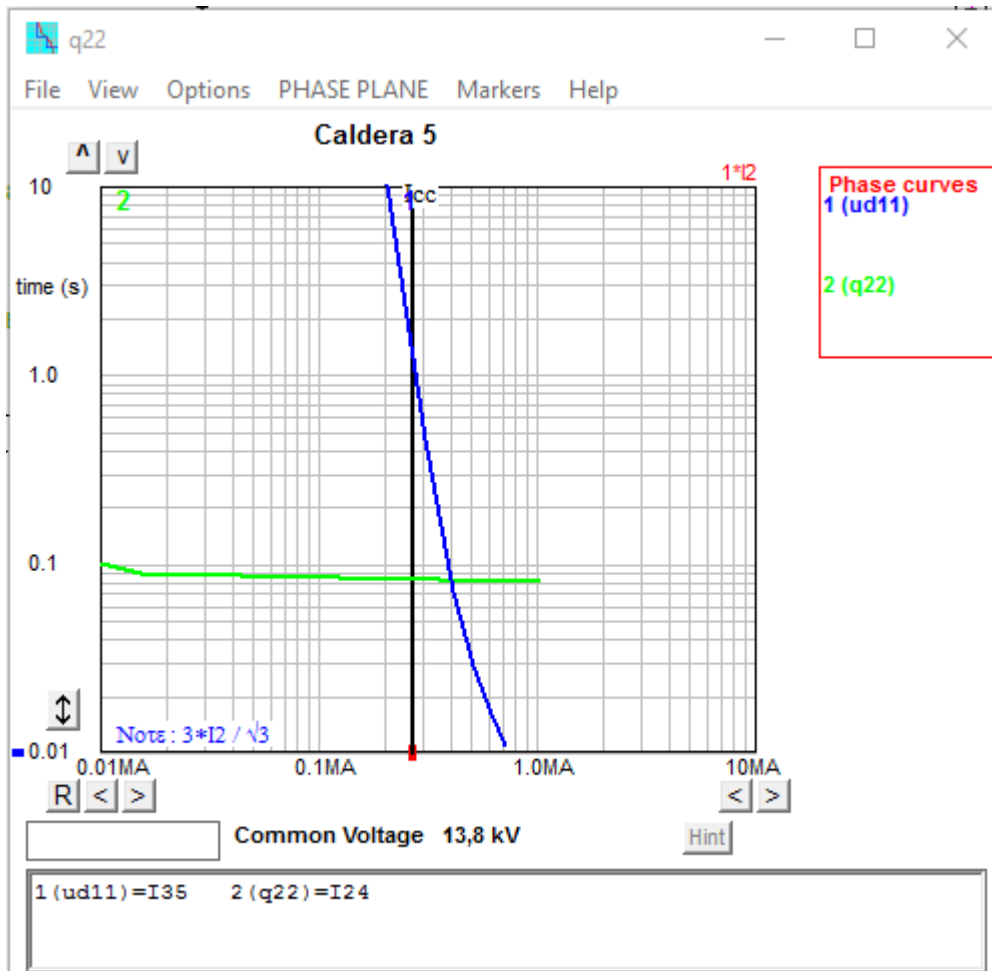
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 55. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Caldera 4**



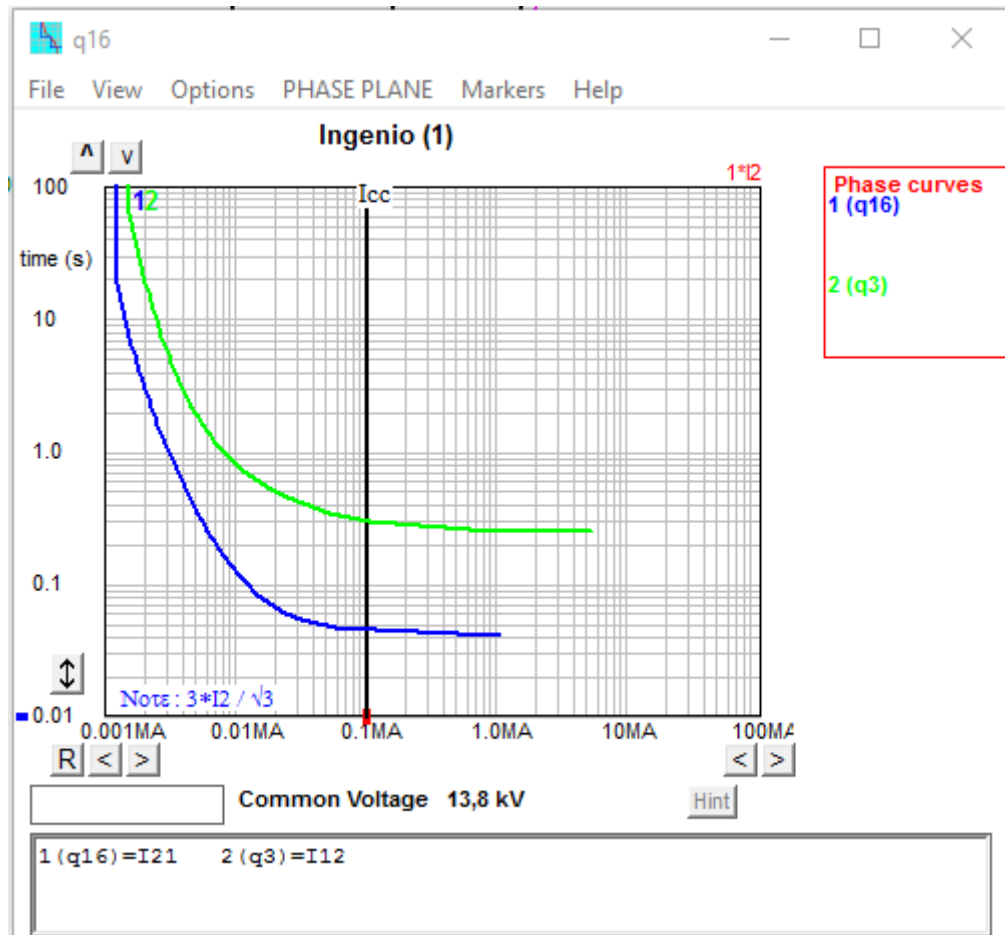
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 56. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Caldera 5**



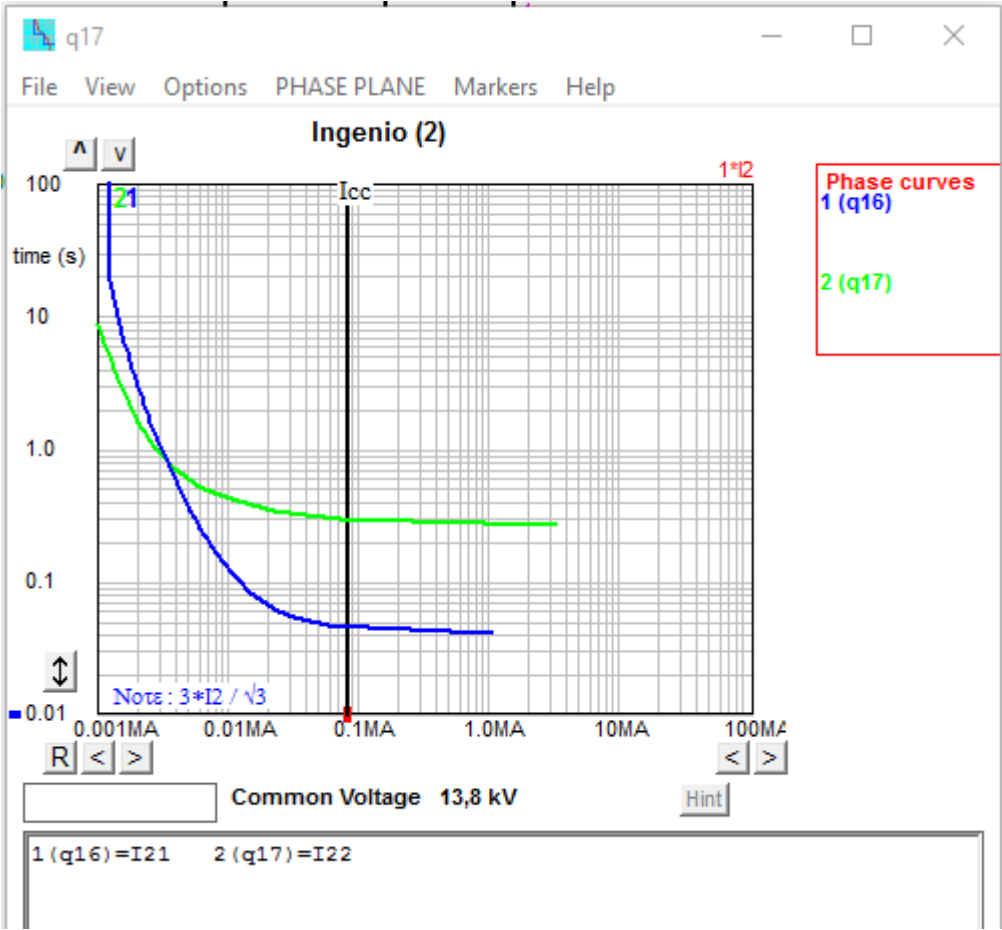
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 57. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Ingenio**



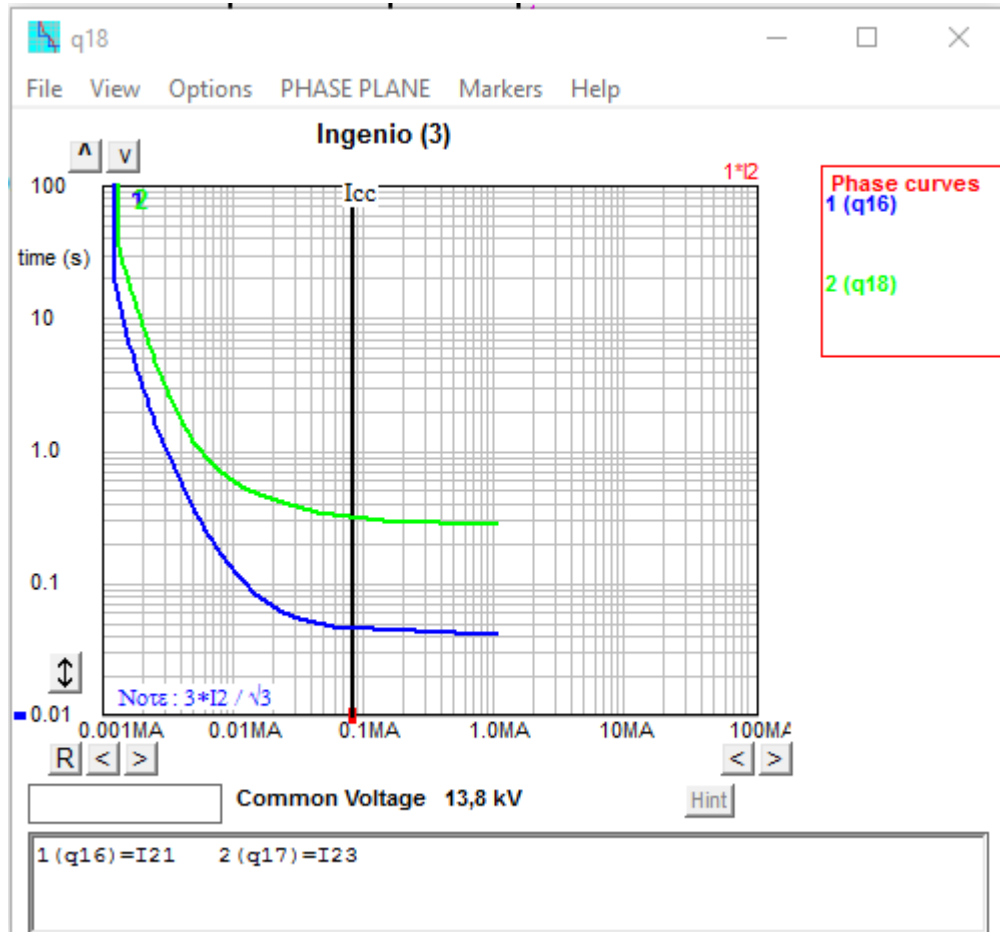
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 58. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Ingenio**



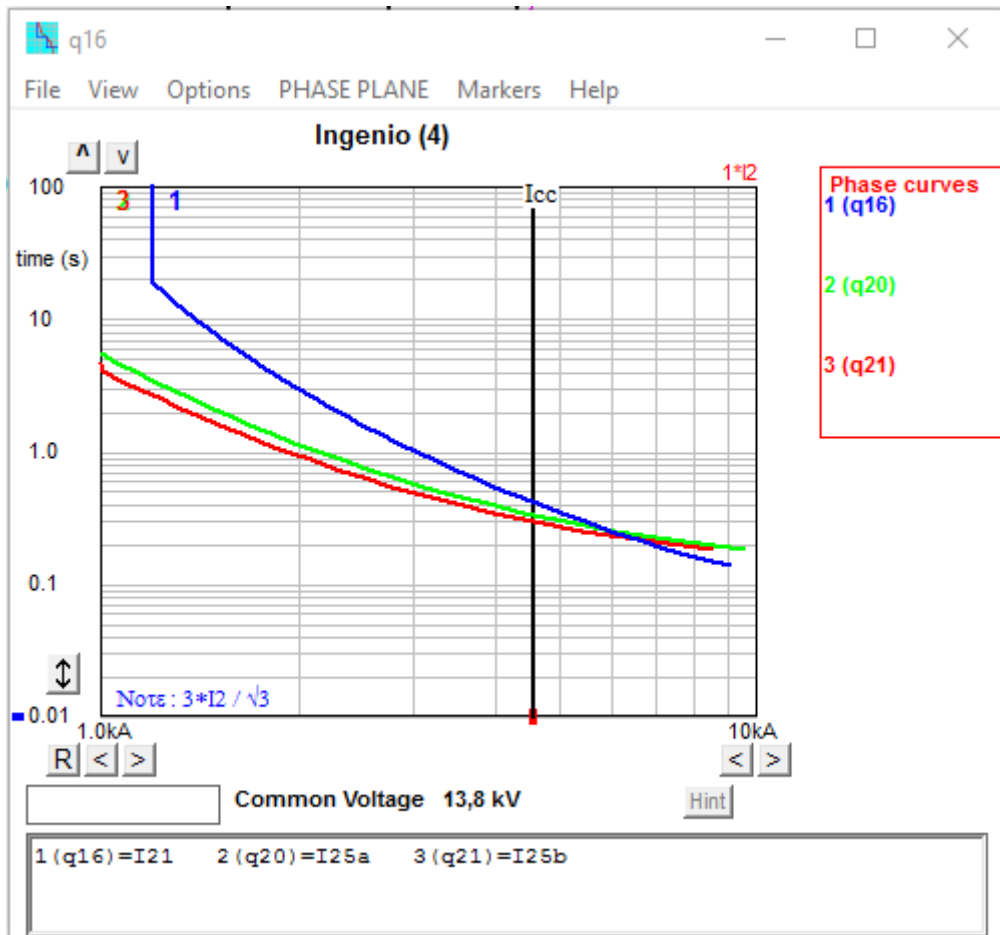
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 59. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Ingenio**



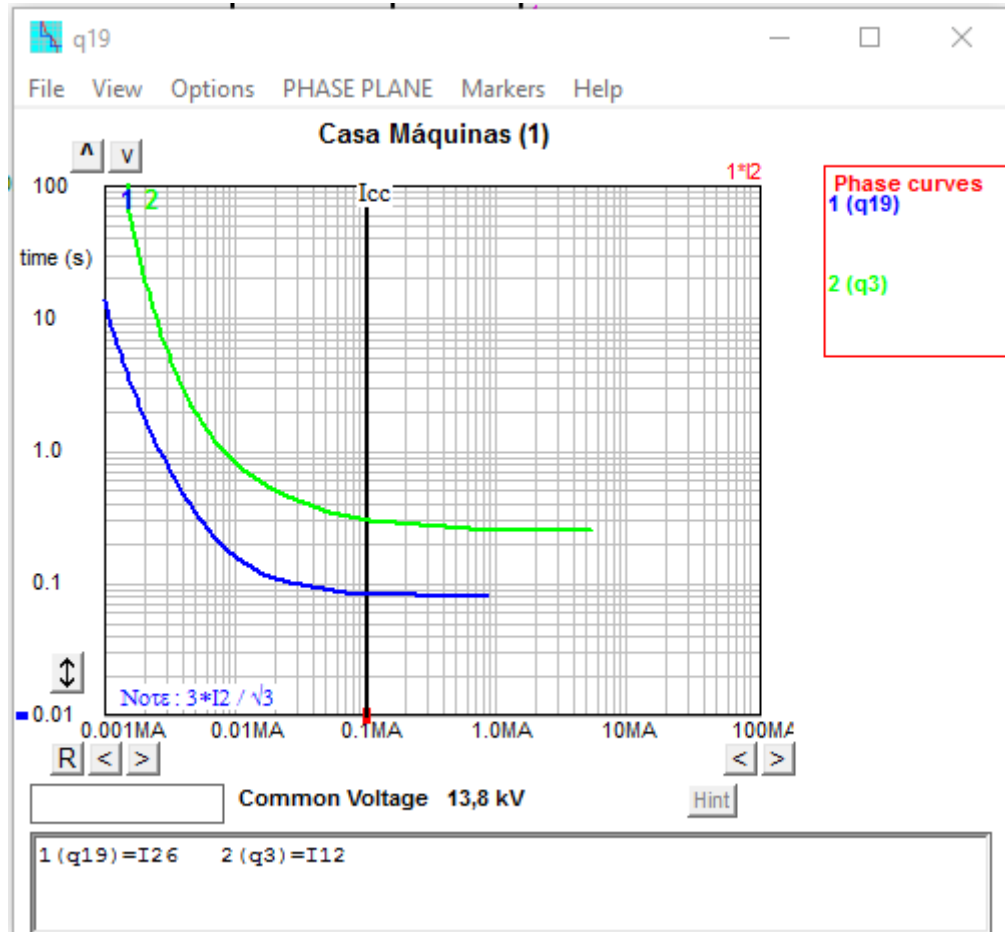
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 60. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Ingenio**



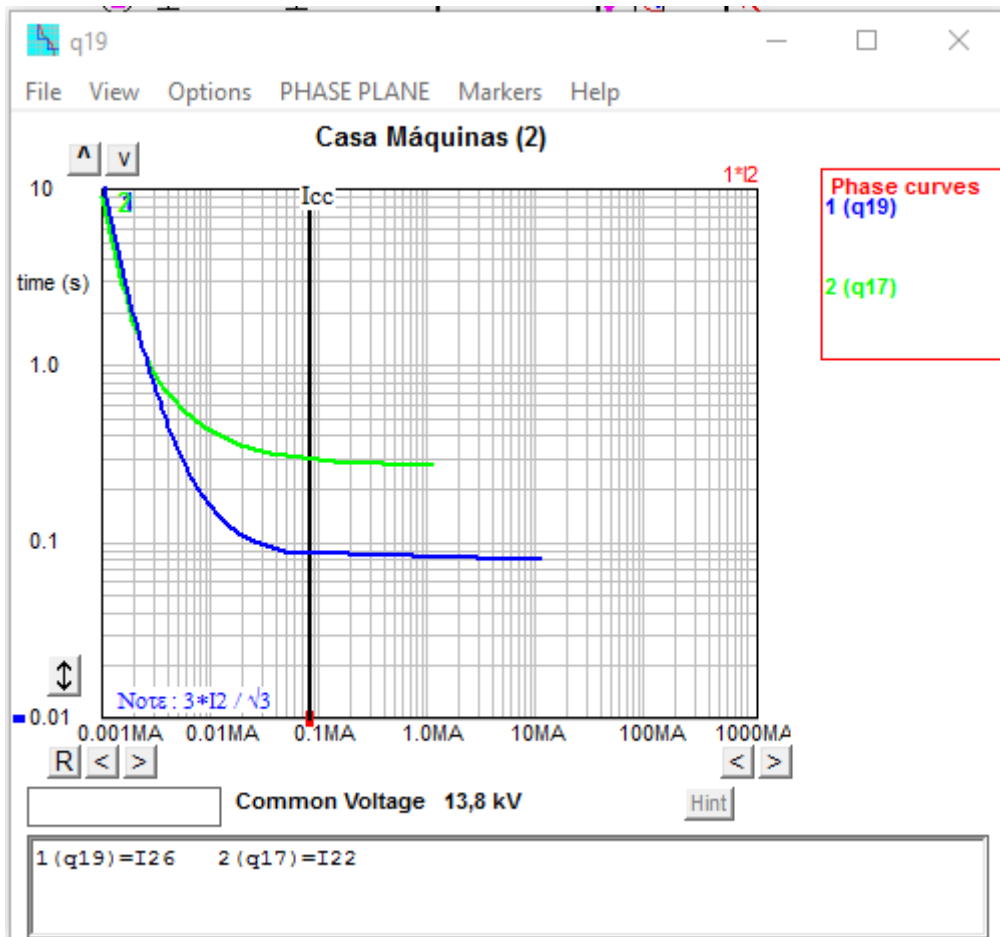
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 61. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Casa Máquinas**



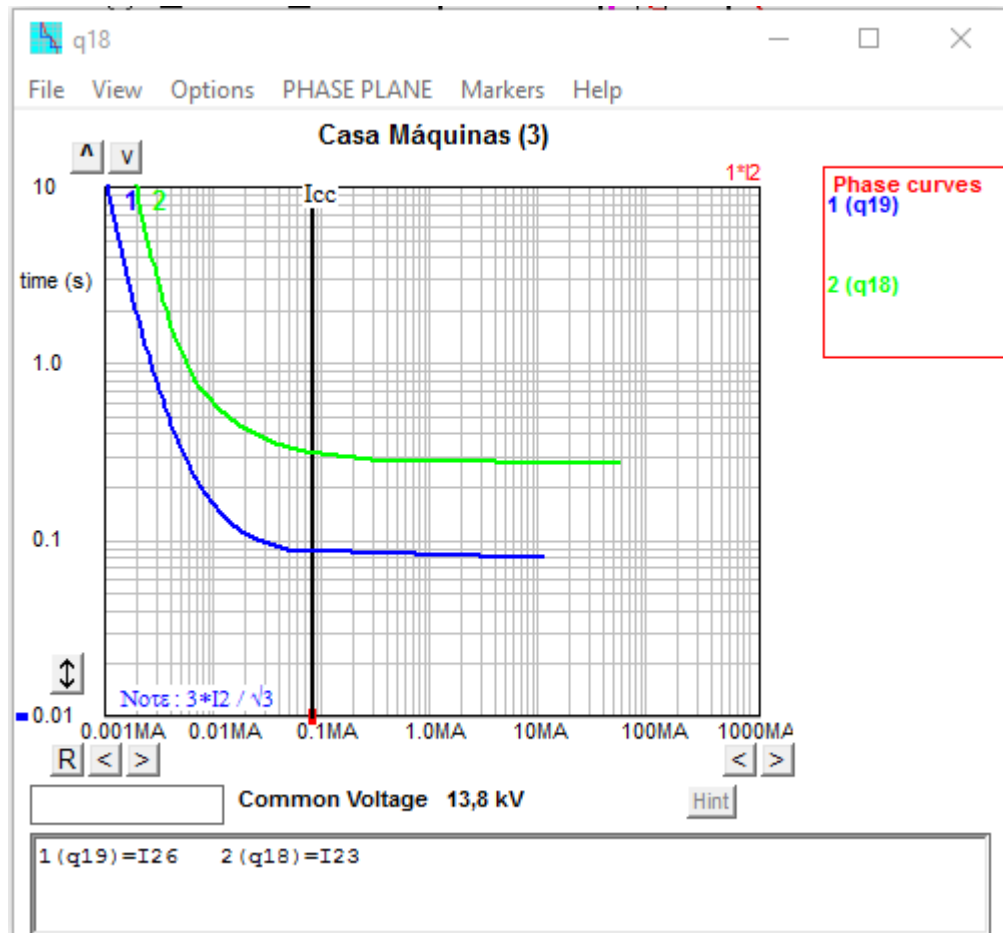
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 62. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Casa Máquinas**



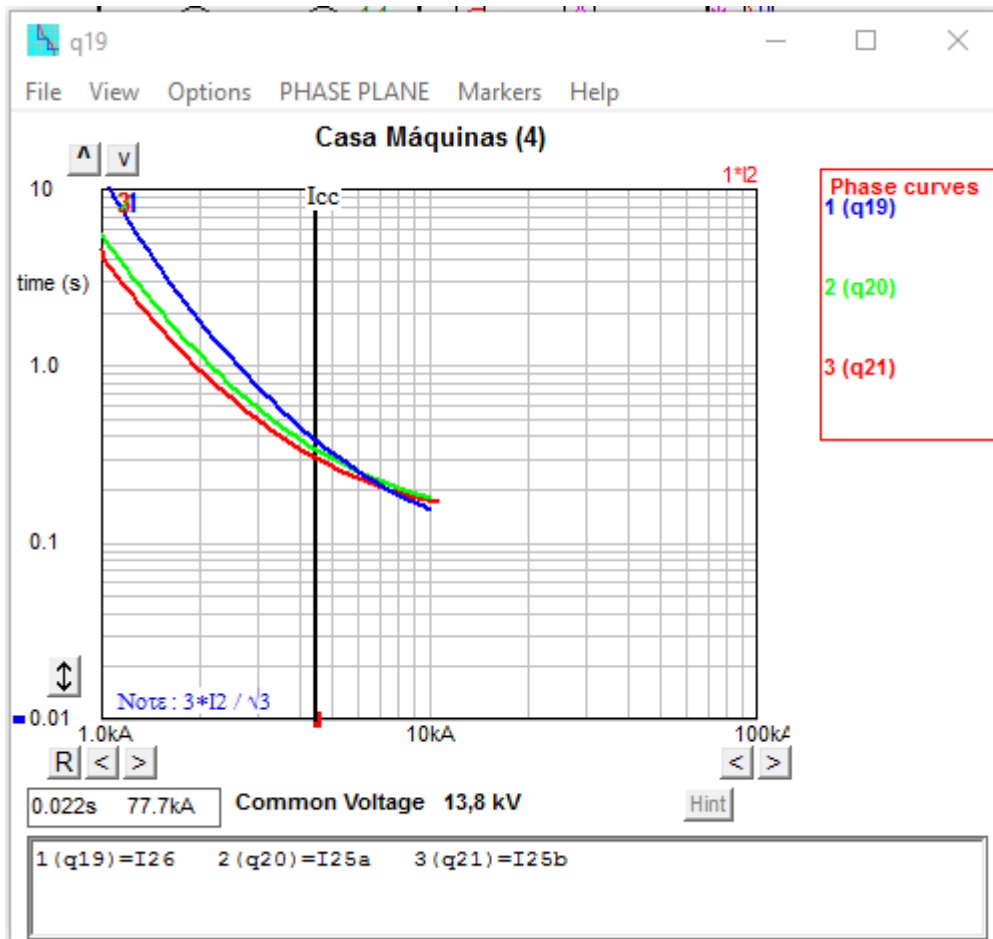
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 63. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Casa Máquinas**



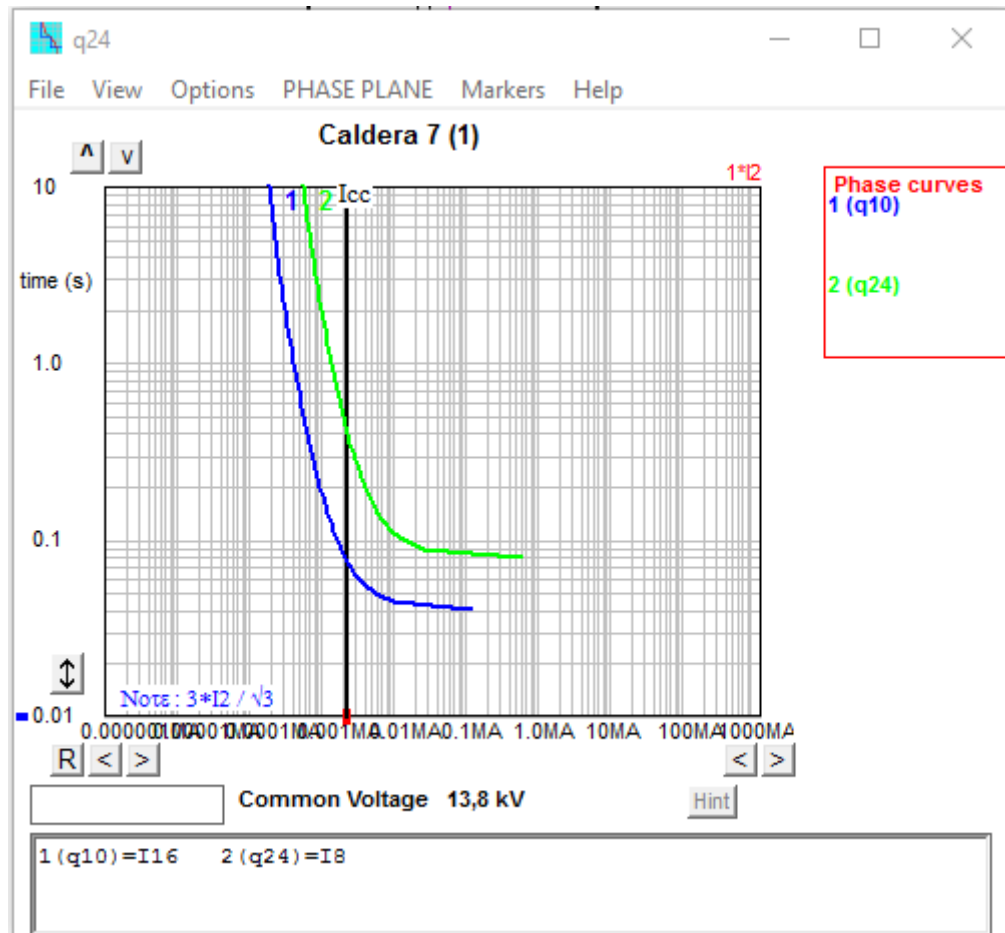
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 64. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Casa Máquinas**



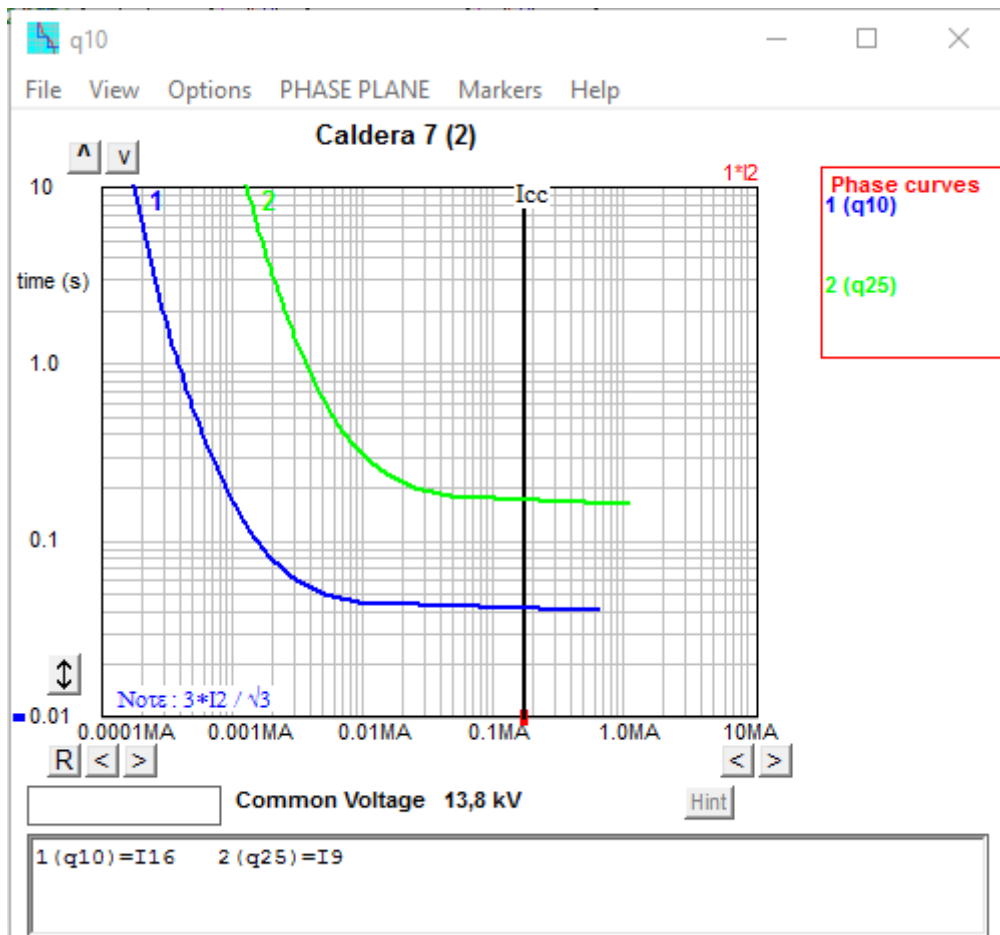
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 65. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Caldera 7**



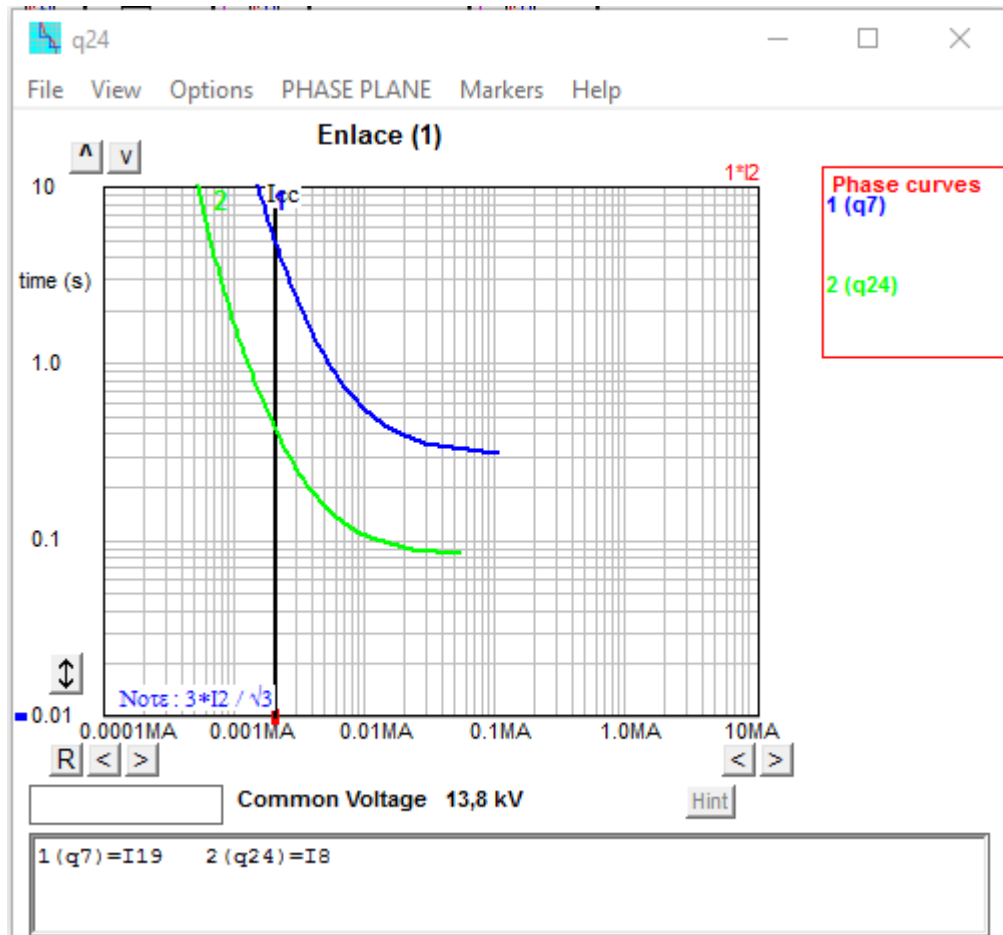
Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 66. **Curvas de protección al simular un cortocircito en la carga Caldera 7**



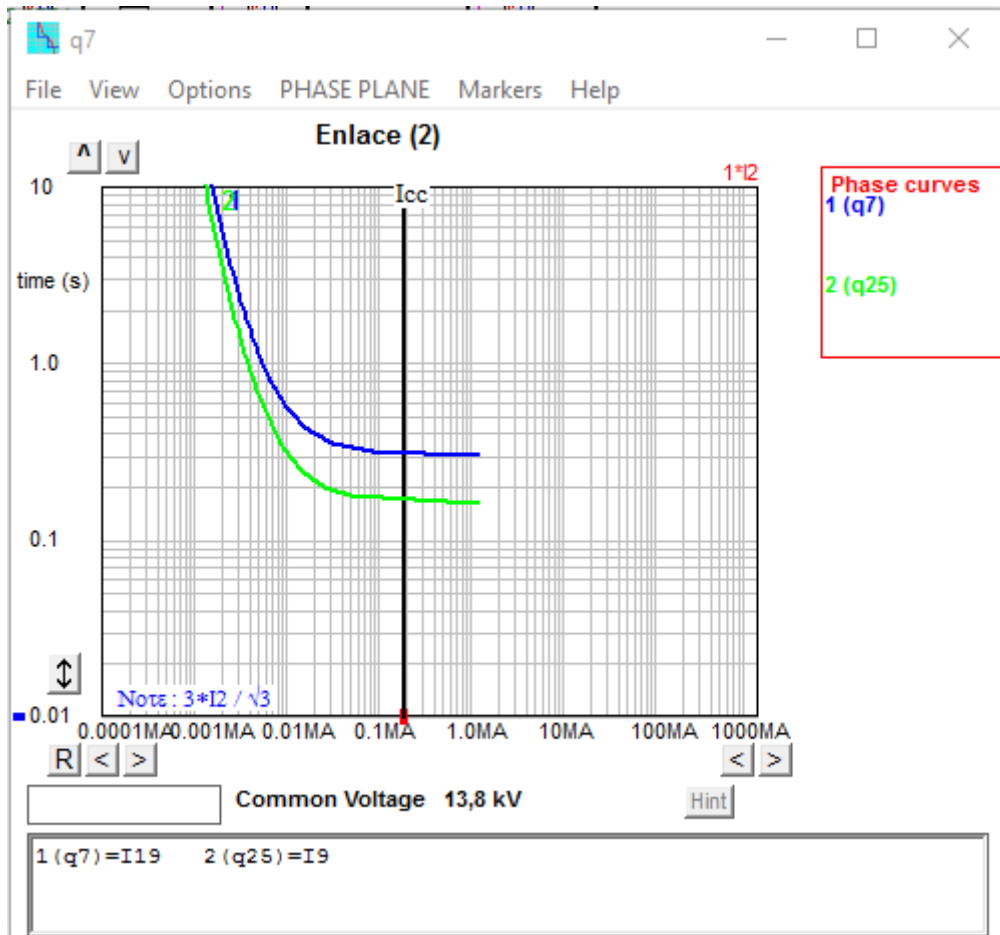
Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

Apéndice 67. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Enlace**



Fuente: elaboración propia, empleando Elplek.

Apéndice 68. **Curvas de protección al simular un cortocircuito en la carga Enlace**

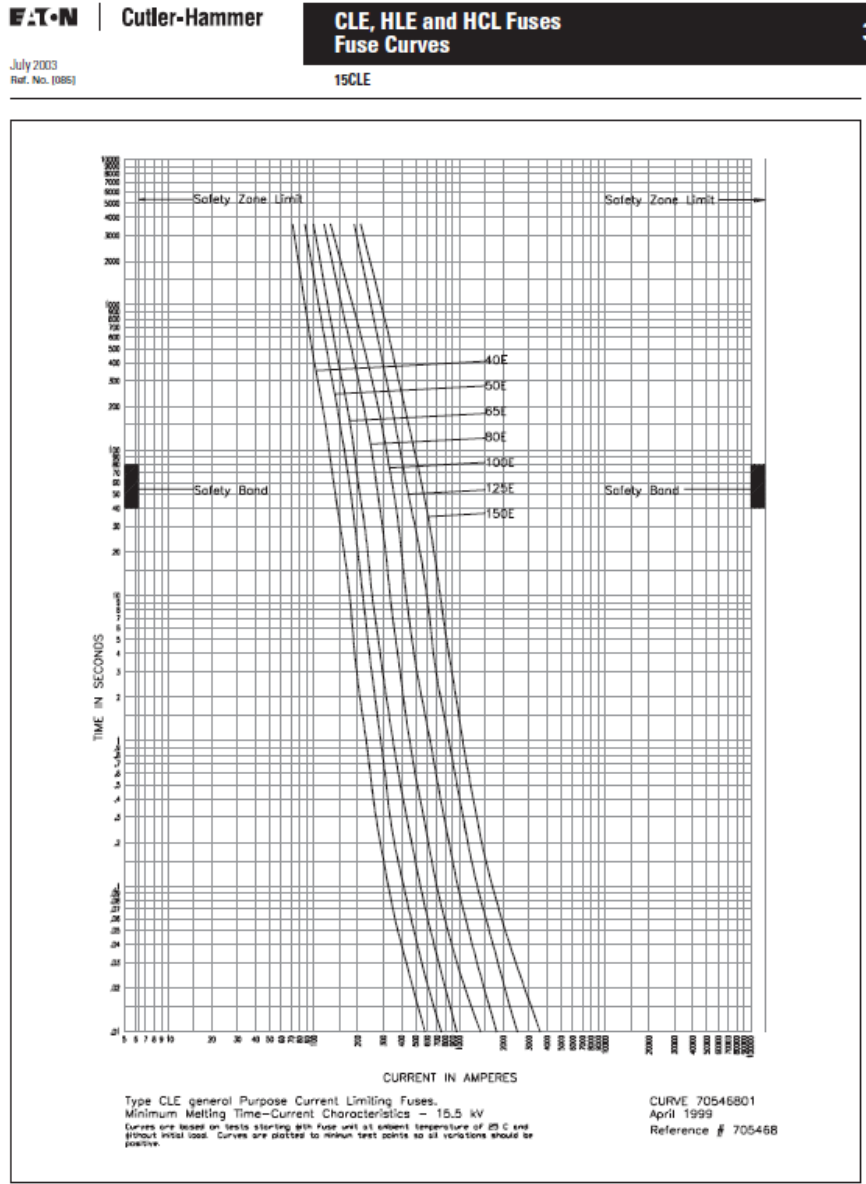


Fuente: elaboración propia, empleando Eplek.

ANEXOS

Curvas utilizadas para los datos introducidos en el programa Elplek correspondiente a los fusibles para la simulación.

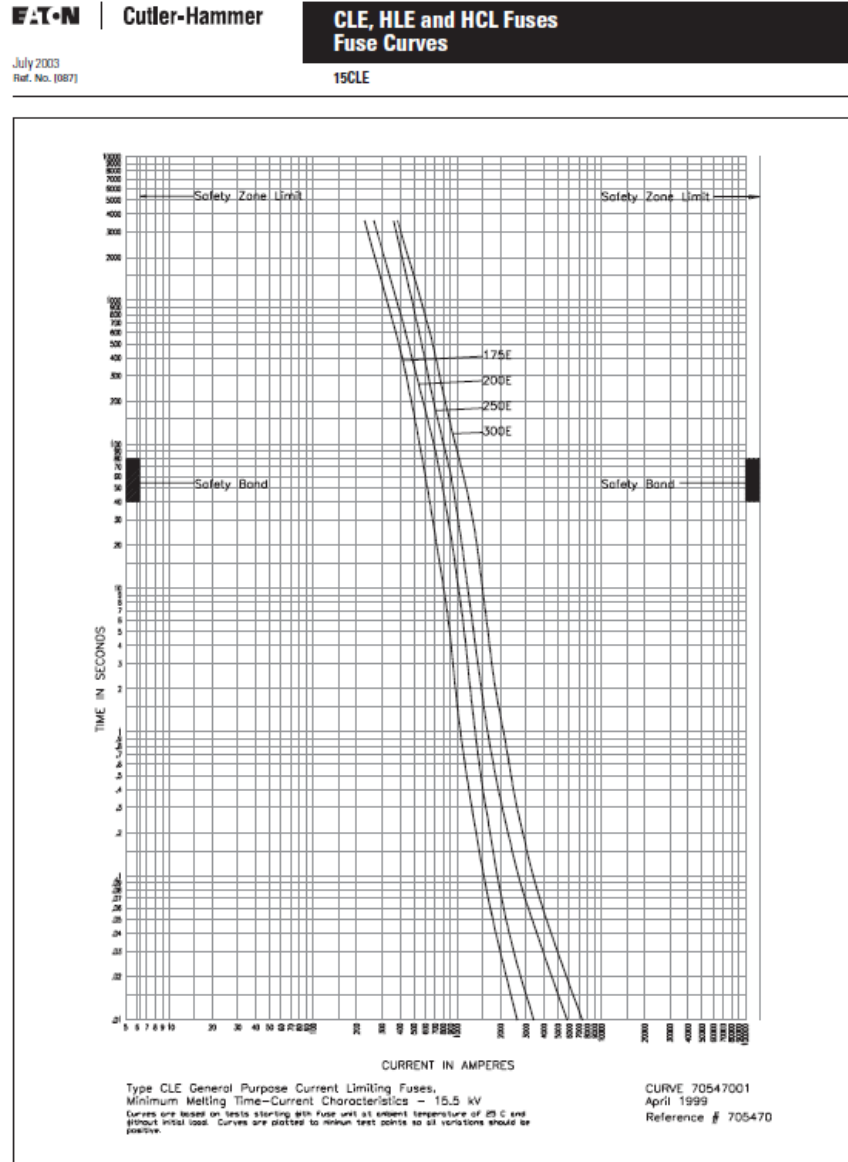
Anexo 1. Curva fusibles de 100A



Fuente:

<http://www.eaton.com/Eaton/SearchResults/index.htm?v%3Aproject=EatonConsolidated&render.function=xml-feed-display-wcm&content-type=text%2Fxml&query=curve+number+70546801&binning-state> Consulta: septiembre de 2016.

Anexo 2. Curva fusibles de 200^a



Fuente:

[http://www.eaton.com/Eaton/SearchResults/index.htm?v%3Aproject=EatonConsolidated&render](http://www.eaton.com/Eaton/SearchResults/index.htm?v%3Aproject=EatonConsolidated&render.function=xml-feed-display-wcm&content-)
[.function=xml-feed-display-wcm&content-](http://www.eaton.com/Eaton/SearchResults/index.htm?v%3Aproject=EatonConsolidated&render.function=xml-feed-display-wcm&content-type=text%2Fxml&query=curve+number+70546801&binning-state)

[type=text%2Fxml&query=curve+number+70546801&binning-state](http://www.eaton.com/Eaton/SearchResults/index.htm?v%3Aproject=EatonConsolidated&render.function=xml-feed-display-wcm&content-type=text%2Fxml&query=curve+number+70546801&binning-state) Consulta: septiembre de
2016.

