



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA S/E PUJILÍ PARA  
REDISTRIBUCIÓN DE CARGA Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES  
EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO 10PJ13B2S1: ALPAMALAG-LA  
MERCED-ISINCHE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL  
COTOPAXI**

**AUTOR: ANDRADE MANTILLA, ANTONY ALEXANDER**

**DIRECTORA: ING. DELGADO MONTENEGRO, IBETH DE LOS  
ÁNGELES**

**LATACUNGA**

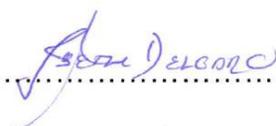
**2019**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**  
**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA S/E PUJILÍ PARA REDISTRIBUCIÓN DE CARGA Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO 10PJ13B2S1: ALPAMALAG-LA MERCED-ISINCHE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI” fue realizado por el señor Andrade Mantilla, Antony Alexander, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de enero de 2019

  
.....

Ing. Delgado Montenegro, Ibeth de los Angeles

C. C. 0400916516



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Andrade Mantilla, Antony Alexander, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA S/E PUJILÍ PARA REDISTRIBUCIÓN DE CARGA Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO 10PJ13B2S1: ALPAMALAG-LA MERCED-ISINCHE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 25 de enero de 2019

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Antony Alexander Andrade Mantilla', is positioned above a horizontal dotted line.

Andrade Mantilla, Antony Alexander

C.C.: 0503439440



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Andrade Mantilla, Antony Alexander, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA S/E PUJILÍ PARA REDISTRIBUCIÓN DE CARGA Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN EL ALIMENTADOR PRIMARIO 10PJ13B2S1: ALPAMALAG-LA MERCED-ISINCHE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 25 de enero de 2019

.....  
Andrade Mantilla, Antony Alexander

C.C.: 0503439440

## AGRADECIMIENTO

A Dios, que ha sido el pilar fundamental para mi formación Universitaria, mismo que me ha apoyado en los momentos más difíciles y ha derramado bendiciones para fortalecerme como estudiante y persona.

A mis padres Fanny y Marco quienes, gracias a su apoyo, lograron construir un gran camino para mí y así desenvolverme cada día sabiendo el esfuerzo y sacrificio que realizaron hasta esta etapa de mi vida.

A mis hermanos Romel, Fernanda, Johana, quienes fueron los tutores excepcionales de vida, me han llevado de sus manos siempre y me inculcaron el camino correcto a seguir.

Al ingeniero Henry Calle, cuya sabiduría, dedicación y paciencia fue de grata ayuda para el desarrollo del presente proyecto.

A mis prestigiados docentes, cuya formación y sabiduría, encaminaron un trayecto estudiantil lleno de conocimientos tanto educativos como morales, con la expectativa de salida hacia un gran sendero en la vida después de la Universidad.

En fin, a todas las personas las cuales, de una u otra manera, aportaron con su granito de arena para mi desarrollo como estudiante y persona.

*Tony*

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico profundamente a Dios y a mis padres Fanny y Marco, que fueron el impulso y el apoyo que necesitaba para lograr completar satisfactoriamente mi carrera Universitaria. Gracias a su infinito amor y cariño, además de su paciencia y determinación para llegar a este día.

A mis hermanos Romel, Fernanda y Johana, quienes me llevaron por el buen camino como mis segundos padres.

A la Dirección Técnica de ELEPCO, quienes me compartieron grandes enseñanzas en el mundo laboral, me apoyaron en todo momento, y fueron pacientes en mi desarrollo profesional.

A mis amigos, con los cuales compartí y compartiré momentos gratos, inolvidables y sobre todo especiales: Parkingzone, D-(2n)!, AC-308.

A todas las personas que, con sus palabras y acciones, fortalecieron el camino de esta etapa y creyeron en mí.

*Tony*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii

### CAPÍTULO I

#### CONTENIDOS GENERALES

1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación e Importancia.....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos .....	3

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes Investigativos .....	5
2.2.	Sistemas de Distribución .....	7
2.2.1.	Estación de Distribución .....	7
2.2.2.	Troncal primario o ramal principal .....	8
2.2.3.	Transformador de distribución .....	8
2.2.4.	Ramales secundarios .....	9
2.3.	Clasificación de redes de distribución acorde al entorno instalado .....	9
2.3.1.	Redes de distribución aéreas .....	9
2.3.2.	Redes de distribución subterránea .....	10
2.4.	Análisis de fallas .....	11
2.4.1.	Sobrecarga .....	11
2.4.2.	Cortocircuitos.....	11
a.	Tipos de cortocircuitos .....	13
2.5.	Dispositivos de Protección.....	14
2.5.1.	Fusibles .....	14
a.	Selección de la corriente nominal .....	17
b.	Selección del voltaje nominal.....	17
c.	Selección de la capacidad de cortocircuito .....	18
d.	Curvas características .....	18
2.5.2.	Relés de sobrecorriente.....	19
a.	Tipos de relés de sobrecorriente.....	20
2.5.3.	Reconectores .....	22

2.6.	Filosofía de Protecciones .....	25
2.6.1.	Sensibilidad .....	25
2.6.2.	Selectividad .....	26
2.6.3.	Rapidez .....	26
2.6.4.	Fiabilidad .....	27
2.7.	Tipos de protecciones.....	27
2.7.1.	Protección Primaria .....	27
2.7.2.	Protección de Respaldo.....	28
2.8.	Coordinación de protecciones eléctricas en sistemas de distribución .....	29
2.8.1.	Coordinación fusible – fusible .....	29
2.8.2.	Fusible de expulsión – transformador .....	30
2.8.3.	Coordinación reconectador – fusible.....	31
2.8.4.	Coordinación relé – fusible .....	33
2.8.5.	Coordinación relé – reconectador .....	34
2.9.	Software CYMDIST .....	35
2.10.	Software CYMTCC .....	36
2.11.	Fundamentación Legal .....	37
2.12.	Hipótesis.....	37
2.13.	Sistema de Variables.....	38
2.14.	Cuadro de operacionalización de las variables .....	38

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

3.1.	Modalidad de investigación.....	40
3.1.1.	Investigación Bibliográfica .....	40
3.1.2.	Investigación de Campo .....	41
3.1.3.	Investigación Experimental.....	41
3.2.	Tipo de investigación.....	41
3.2.1.	Investigación Cuantitativa.....	41
3.3.	Diseño de la investigación .....	42
3.4.	Población y muestra .....	42
3.5.	Técnica de recolección de datos .....	43
3.5.1.	Instrumentos.....	43
3.5.2.	Variables cuantitativas.....	43
3.5.3.	Validez y confiabilidad .....	43
3.6.	Técnica de análisis de datos.....	43
3.6.1.	Clasificación y procesado de datos.....	43
3.7.	Técnica de comprobación de hipótesis.....	44
3.7.1.	Comprobación cuantitativa .....	44

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

4.1.	Descripción del modelo actual de la subestación.....	45
4.1.1.	Subestación Pujilí .....	45
4.2.	Alimentadores Primarios.....	47

	x
4.2.1. Alimentador Pujilí Zumbahua .....	47
a. Recorrido .....	48
b. Ajuste de protecciones del alimentador .....	48
4.2.2. Alimentador Pujilí Centro .....	49
a. Recorrido .....	49
b. Ajuste de protecciones del alimentador .....	49
4.3. Análisis de la situación actual de los alimentadores primarios .....	50

## **CAPÍTULO V**

### **PROPUESTA**

5.1. Datos informativos .....	51
5.1.1. Beneficiarios .....	51
5.2. Objetivos .....	51
5.2.1. Objetivo General.....	51
5.2.2. Objetivos Específicos .....	52
5.3. Fundamentación propuesta .....	52
5.4. Diseño de la propuesta .....	53
5.5. Redistribución de carga de los alimentadores.....	54
5.6. Modelamiento del alimentador 10PJ13B2S1 mediante CYMDIST .....	54
5.6.1. Parámetros del sistema .....	54
5.6.2. Implementación de la base de datos de equipos .....	55
5.6.3. Modelación de los equipos .....	56
a. Fuentes .....	56
b. Transformadores .....	58

c.	Conductores .....	59
5.7.	Modelación del alimentador redistribuido.....	60
5.7.1.	Modelo actual .....	60
5.7.2.	Modelo Redistribuido .....	61
5.8.	Análisis de cortocircuitos .....	63
5.8.1.	Resultados del estudio del Cortocircuito .....	64
5.9.	Metodología de coordinación.....	65
5.10.	Procedimiento de coordinación.....	65
5.11.	Selección de fusibles .....	66
5.12.	Coordinación de protecciones del alimentador Alpamalag – La Merced – Isinche de la S/E Pujilí .....	67
5.12.1.	Fusibles para bancos de transformación .....	67
5.12.2.	Coordinación y ajuste de fusibles en los ramales del alimentador .....	70
a.	Coordinación Zona 1 .....	70
b.	Coordinación Zona 2 .....	75
c.	Coordinación Zona 3 .....	76
5.12.3.	Ajustes de reconectores .....	77
a.	Reconector Zona 1 .....	78
b.	Reconector Zona 2 .....	80
c.	Reconector Zona 3 .....	81
5.12.4.	Ajuste de relés.....	83
a.	Configuración del relé Schweitzer SEL 451 .....	83
5.13.	Secuencias de operación por zonas .....	87
5.13.1.	Zona 1 .....	88
5.13.2.	Zona 2 .....	89

	xii
5.13.3. Zona 3 .....	90
5.14. Resultados y ajustes de la coordinación conjunta.....	91
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>97</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Tipos de fallas eléctricas .....	13
<b>Tabla 2</b>	Operacionalización de la variable independiente .....	38
<b>Tabla 3</b>	Operacionalización de la variable dependiente .....	39
<b>Tabla 4</b>	Descripción del transformador de la subestación Pujilí 69/13,8 kV.....	45
<b>Tabla 5</b>	Descripción del transformador de la subestación Pujilí 69/13,8 kV.....	46
<b>Tabla 6</b>	Cantidad de capacidad instalada en el alimentador Pujilí / Zumbahua .....	47
<b>Tabla 7</b>	Ajustes del relé 50/51 del alimentador Pujilí / Zumbahua .....	48
<b>Tabla 8</b>	Cantidad de capacidad instalada en el alimentador Pujilí / Centro .....	49
<b>Tabla 9</b>	Ajustes del relé 50/51 del alimentador Pujilí / Centro .....	50
<b>Tabla 10</b>	Características de los conductores ACSR.....	60
<b>Tabla 11</b>	Cuadro resumido de análisis de cortocircuitos del alimentador .....	64
<b>Tabla 12</b>	Denominación EEI-NEMA y corrientes nominales de fusibles tipo K y T .....	67
<b>Tabla 13</b>	Protección de transformadores 1Ø con fusibles tipo T y SF .....	69
<b>Tabla 14</b>	Protección de transformadores 3Ø con fusibles tipo T y SF .....	69
<b>Tabla 15</b>	Coordinación de fusibles de la zona 1 del alimentador.....	74
<b>Tabla 16</b>	Coordinación de fusibles de la zona 2 del alimentador.....	75
<b>Tabla 17</b>	Coordinación de fusibles de la zona 3 del alimentador.....	76
<b>Tabla 18</b>	Ajustes del reconectador zona 1 .....	80
<b>Tabla 19</b>	Ajustes del reconectador zona 2 .....	80
<b>Tabla 20</b>	Ajustes del reconectador zona 3 .....	82
<b>Tabla 21</b>	Configuración del relé 50/51 y 50/51N del alimentador .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Subestación de Distribución "El Calvario" .....	8
<b>Figura 2.</b>	Estructura de un listón fusible .....	15
<b>Figura 3.</b>	Diferencia de fusibles tipo K (azul) y tipo T (rojo) de la misma capacidad....	16
<b>Figura 4.</b>	Curva tiempo-corriente de un fusible .....	18
<b>Figura 5.</b>	Relé de sobrecorriente de alimentador .....	19
<b>Figura 6.</b>	Reconectador automático de MT .....	22
<b>Figura 7.</b>	Características tiempo - corriente de un reconectador.....	23
<b>Figura 8.</b>	Protección primaria y protección de respaldo .....	28
<b>Figura 9.</b>	Coordinación fusible - fusible.....	29
<b>Figura 10.</b>	Método de coordinación fusible – fusible con $t1/t2 \leq 0,75$ .....	30
<b>Figura 11.</b>	Coordinación reconectador - fusible .....	31
<b>Figura 12.</b>	Método de coordinación reconectador - fusible .....	32
<b>Figura 13.</b>	Coordinación relé - fusible .....	33
<b>Figura 14.</b>	Método de Coordinación relé - fusible .....	33
<b>Figura 15.</b>	Coordinación relé - reconectador.....	34
<b>Figura 16.</b>	Método de Coordinación relé - reconectador .....	34
<b>Figura 17.</b>	Interfaz software CYMDIST .....	35
<b>Figura 18.</b>	Interfaz software CYMTCC .....	37
<b>Figura 19.</b>	Diagrama unifilar de la S/E Pujilí .....	47
<b>Figura 20.</b>	Configuración de parámetros fundamentales del sistema.....	55
<b>Figura 21.</b>	Implementación de la base de datos "Elepco" .....	56
<b>Figura 22.</b>	Datos del equivalente de fuente del alimentador 10PJ13B2S1 .....	57
<b>Figura 23.</b>	Ingreso de potencias de cortocircuito y la relación X/R de la fuente .....	57
<b>Figura 24.</b>	Modelación de transformadores (monofásico) .....	58
<b>Figura 25.</b>	Modelamiento del cable AWG 2/0.....	59
<b>Figura 26.</b>	Fuentes de la S/E Pujilí con dos alimentadores activos .....	61
<b>Figura 27.</b>	Comparación modelo S/E Pujilí actual (izquierda) vs. modelo CYMDIST (derecha).....	62
<b>Figura 28.</b>	Actualización de la zona de concesión Cristo Rey .....	63

<b>Figura 29.</b> Protección de un transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo T .....	67
<b>Figura 30.</b> Protección de un transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo K.....	68
<b>Figura 31.</b> Protección de transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo SF .....	68
<b>Figura 32.</b> Zonas de coordinación alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche .....	70
<b>Figura 33.</b> Selección del fusible 20T.....	71
<b>Figura 34.</b> Ingreso de la corriente de cortocircuito del fusible 20T .....	72
<b>Figura 35.</b> Coordinación de fusibles 20T y 25T.....	72
<b>Figura 36.</b> Resultado de tiempo de respuesta de fusibles a la corriente de falla.....	73
<b>Figura 37.</b> Ajuste de curvas de respuesta y umbral de disparo del reconectador .....	78
<b>Figura 38.</b> Selección del cuadrante de operación de la curva de fase rápida del reconectador .....	79
<b>Figura 39.</b> Coordinación reconectador - fusibles de la zona 1 del alimentador Alpamalag - La Merced – Isinche .....	79
<b>Figura 40.</b> Coordinación reconectador - fusibles de la zona 2 del alimentador Alpamalag - La Merced – Isinche .....	81
<b>Figura 41.</b> Coordinación reconectador - fusibles de la zona 3 del alimentador Alpamalag - La Merced – Isinche .....	82
<b>Figura 42.</b> Configuración del relé 51 (temporizado) del alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche.....	85
<b>Figura 43.</b> Configuración del relé 50 (instantáneo) del alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche.....	86
<b>Figura 44.</b> Coordinación conjunta zona 1 del alimentador .....	88
<b>Figura 45.</b> Secuencia de operación de protecciones de la zona 1 del alimentador .....	88
<b>Figura 46.</b> Coordinación conjunta zona 2 del alimentador .....	89
<b>Figura 47.</b> Secuencia de operación de protecciones de la zona 2 del alimentador .....	89
<b>Figura 48.</b> Coordinación conjunta zona 3 del alimentador .....	90
<b>Figura 49.</b> Secuencia de operación de protecciones de la zona 3 del alimentador .....	90
<b>Figura 50.</b> Coordinación conjunta alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche.....	91

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación realiza la redistribución de carga de las salidas 12 y 23 de la S/E Pujilí perteneciente a la Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi ELEPCO S.A., con el fin de mejorar las condiciones de potencia y energía hacia la zona sur oriental de la ciudad, habilitando la salida 21 de la S/E (barra 2, salida 1). Una vez seccionalizado, se procede a realizar la coordinación de protecciones del nuevo alimentador, habilitado a 13,8 kV, a fin de ofrecer seguridad y disponibilidad al sistema de distribución considerando zonas de protección desde la barra de la S/E hasta el punto más alejado de la misma. Para realizar la coordinación, se desarrollará el modelo detallado del alimentador mediante el uso del software de diseño y análisis CYME – CYMDIST, para obtener resultados del análisis de cortocircuitos, lo que permitirá realizar la selección adecuada de los elementos de protección necesarios. También se utilizará el software de diseño CYMTCC, el cual nos provee información detallada de curvas características de los elementos de protección, para determinar el reporte de la coordinación final del alimentador. Los elementos representativos a utilizar para proteger el alimentador serán: fusibles, reconectores, y relés de protección contra sobrecorriente de fase y neutro.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **REDISTRIBUCIÓN DE CARGAS ELÉCTRICAS**
- **SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN**
- **PROTECCIONES ELÉCTRICAS**
- **EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.**

## **ABSTRACT**

The present research work realizes the redistribution of load of feeders 12 and 23 of the S/E Pujilí belonging to Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi ELEPCO S.A, in order to improve power and energy conditions to the south eastern area of the city by enabling bus 21 of the S/E (bus 2, exit 1). Once the circuit has been sectioned, the protection coordination of the new feeder, enabled at 13.8 kV, is carried out in order to provide security and reliability to the distribution system, considering protection zones from the S/E bus to the furthest point of it, in order to carry out the coordination, the detailed model of the feeder will be developed using the design and analysis software CYME - CYMDIST, for getting results of the short circuit analysis which will allow to make the adequate selection of the necessary protection elements. The CYMTCC design software will also be used, which provides us with detailed information of the characteristic curves of the protection elements, to determine the final report of the feeder coordination. The representative elements to be used to protect the feeder will be: fuses, reclosers, and protection relays against phase and neutral overcurrents.

### **KEYWORDS:**

- **REDISTRIBUTION OF ELECTRIC LOADS**
- **DISTRIBUTION SUBSTATIONS**
- **ELECTRICAL PROTECTIONS**
- **EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.**

# CAPÍTULO I

## CONTENIDOS GENERALES

### 1.1. Planteamiento del Problema

La creciente demanda de potencia y energía que los usuarios de una localización requieren hace necesaria la habilitación de nuevas salidas de las subestaciones. La salida 3 de la barra 2 de la S/E Pujilí suministra el servicio de energía eléctrica hacia la comunidad urbana y rural del cantón Pujilí comprendida desde la S/E Pujilí, hacia el oriente, hasta el límite con la salida 2 de la S/E San Rafael, la cual se ha venido sobrecargando con el paso del tiempo.

Además, del análisis de las interrupciones de servicio del alimentador Pujilí Zumbahua se observan 6 interrupciones programadas y 49 interrupciones no programadas; mientras que en el alimentador Pujilí Centro se han presentado 7 interrupciones programadas y 81 interrupciones no programadas.

Por lo cual se hace necesaria la energización de la salida 1 de la barra 2 de la S/E Pujilí para realizar una redistribución de cargas y así, abastecer a la zona rural sur oriental del cantón Pujilí, evitando la sobrecarga de los primarios, y reducir las pérdidas de energía.

Debido a esto se requiere realizar la coordinación de protecciones eléctricas en la salida 10PJ13B2S1 para su entrada en operación y despejar coordinadamente cualquier tipo de falla eléctrica en el sistema.

## 1.2. Antecedentes

La demanda de energía que se presenta en nuestro país va creciendo con el paso del tiempo, por lo que, la distribución de energía administrada por las empresas responsables, realizan constantemente mejoras en sus instalaciones para brindar el servicio con un concepto de fiabilidad, seguridad y continuidad.

En principio, la energía eléctrica suministrada hacia el cantón Pujilí, era suministrada por la S/E San Rafael ubicada en el sector oriental de la ciudad de Latacunga, la cual se encuentra lejos de la carga del cantón Pujilí.

Para satisfacer la demanda de energía, se instaló la subestación Pujilí, y se redistribuyó la carga entre dos alimentadores con un transformador de 5 MVA a niveles de voltaje de 69/13,8 kV: Pujilí Centro y Pujilí Zumbahua.

Posteriormente, se instaló un nuevo transformador de potencia de 10/12 MVA en la misma S/E Pujilí, con una nueva barra de 13,8 Kv para abastecer la demanda creciente, tanto presente como futura.

Por lo tanto, se ha requerido la activación de la salida 21 de la S/E Pujilí y reubicar la zona de operación del alimentador para abastecer únicamente a la población rural sur oriental del cantón.

### **1.3. Justificación e Importancia**

Debido al continuo crecimiento de la demanda de potencia y energía de los alimentadores primarios 12 y 23 de la S/E Pujilí, la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A., con el objetivo de establecer una mejora eficiente de calidad en el servicio y reducir pérdidas de energía, aparte de mejorar las condiciones operativas del sistema, habilitará el disyuntor 1 de la barra 2 de la subestación.

Por lo que es requerido realizar el análisis del sistema eléctrico de la S/E Pujilí para la redistribución de carga desde los alimentadores 12 y 23 hacia el alimentador 10PJ13B2S1 de la subestación y posteriormente, realizar los ajustes de las protecciones eléctricas mediante la adecuada coordinación.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar el sistema eléctrico de la S/E Pujilí para realizar redistribución de carga y su respectiva coordinación de protecciones en el alimentador 10PJ13B2S1: Alpamalag-La Merced-Isinche, mediante el análisis de la red eléctrica por cortocircuitos para garantizar la disponibilidad del suministro eléctrico, en la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un análisis del sistema eléctrico existente para el estudio de cortocircuitos.
- Analizar la redistribución de carga de los alimentadores existentes para su implementación en el alimentador de estudio.

- Realizar una modelación detallada del alimentador primario de la subestación Pujilí en estudio.
- Analizar las condiciones de falla presentes en los alimentadores, que reducen el suministro de energía eléctrica de la zona.
- Realizar la configuración y calibración de las protecciones eléctricas, tomando en cuenta criterios preestablecidos y empleando sistemas computacionales.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes Investigativos

En todo sistema eléctrico debe estar presente la seguridad tanto de la red como de las personas que la maniobran. Según Katyara, Staszewski, & Leonowicz (2018), en su documento investigativo: “Protection Coordination of Properly Sized and Placed Distributed Generations-Methods, Applications and Future Scope”, agrega que, ante cualquier cambio presentado en una red de distribución, las protecciones eléctricas deben actuar en tal magnitud que no afecte a la operación de la red. Los autores mencionan: “La coordinación adecuada de los relés situados en una ubicación óptima, aumenta la disponibilidad y fiabilidad de la red en condiciones de funcionamiento anómalas”

La adecuada coordinación de las protecciones eléctricas, brinda al sistema eléctrico la capacidad de tomar acciones rápidas en contra de fallas que se presenten en cualquier momento, además de operar únicamente en su área de concesión sin afectar la operatividad de sectores aledaños. Es por ello que Tuta & Hincapié (2011), hacen énfasis en la correcta coordinación de las protecciones, expresando: “Una adecuada coordinación de dispositivos de protección en sistemas de distribución de energía eléctrica es extremadamente importante, no solo por la mejora en la selectividad y confiabilidad del sistema de protecciones, sino también por el mejoramiento en la calidad y continuidad del servicio.”

El estudio de los parámetros de protecciones, brinda confianza, responsabilidad, seguridad y disponibilidad a un sistema de distribución y hacia los usuarios, según Xavier Armando Guano Sinchiguano (2017) en su trabajo de investigación: “Coordinación de las protecciones de sobrecorriente del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ante el cambio de configuración de red radial a red en anillo”, realiza una recopilación de criterios de coordinación de protecciones considerando el cambio de configuración del sistema de subtransmisión, por lo que se da una recomendación de equipos y ajustes para una adecuada operación del nuevo sistema. Guano menciona “Es de vital importancia, dentro de las empresas, tener un eficiente sistema de protecciones, para asegurar la integridad del personal y de los elementos eléctricos protegidos y la continuidad del servicio eléctrico”.

Por tal motivo, es necesario poseer una buena confiabilidad del sistema, así Edwin Oswaldo Segovia Albarrasín (2010), en su trabajo de investigación: “Coordinación de protecciones en el alimentador de distribución Cerro 8”, calcula los parámetros de los alimentadores del circuito de distribución asignado, cuantificando los cálculos para obtener confiabilidad en los ajustes de las protecciones eléctricas. Mencionando “los resultados deben elevar la confiabilidad en el suministro a los consumidores, disminuyendo la energía dejada de servir por fallas no permanentes, así como las interrupciones que se derivan de la no selectividad de las protecciones.”

La base del presente proyecto está en la recopilación de datos del sistema eléctrico de los alimentadores primarios activos de la subestación Pujilí, para así realizar la modelación del nuevo alimentador 21 de la misma y, mediante la utilización del software

CYMDIST, realizar la redistribución de carga para obtener, mediante pruebas simuladas de cortocircuitos, los resultados que permitirán determinar la selección, coordinación y ajuste de los equipos de protección para el nuevo sistema eléctrico.

## **2.2. Sistemas de Distribución**

Un Sistema Eléctrico de Potencia está formado por Estaciones de Generación, Transformadores Elevadores, Reductores, Líneas de Transmisión, Subtransmisión, Estaciones Transformadoras de Distribución y sus respectivas redes de Distribución. (Regalado, 2003)

Un Sistema de Distribución, se conforma por la subestación de distribución, los alimentadores primarios, transformadores de distribución, circuitos secundarios, acometidas (líneas bajantes), los contadores de energía y los usuarios (consumidores). Como elementos de protección del sistema de distribución se encuentran: interruptores, seccionadores, relés, reconectadores y fusibles. (Regalado, 2003)

La función de un sistema de distribución reside en adquirir la potencia eléctrica de los transformadores de distribución y repartirla hacia los distintos puntos de carga, controlando que el nivel de voltaje y la regularidad sea la óptima para que el usuario reciba un servicio sin interrupciones, permitiendo operar los electrodomésticos con propiedad. (Regalado, 2003)

### **2.2.1. Estación de Distribución**

Son aquellas instalaciones que presentan los transformadores de potencia encargados de reducir el voltaje de las líneas de subtransmisión de 69 kV a 13,8 kV.



**Figura 1.** Subestación de Distribución "El Calvario"

### **2.2.2. Troncal primario o ramal principal**

Son las líneas ubicadas por cada una de las zonas de afluencia urbana y rural de la subestación, proporcionando energía eléctrica a los puntos de carga (transformadores de distribución).

Los circuitos primarios se conforman por los alimentadores principales o los troncos del circuito, y sus ramales laterales y sublaterales. Los niveles de voltaje empleados por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi son de 13,8 kV L-L. (Chanatasig, 2016)

### **2.2.3. Transformador de distribución**

Son los elementos destinados a la distribución de energía eléctrica local, reduciendo el voltaje a niveles regulados para las zonas de consumo: de 13,8 kV a 127-220 V. (Chanatasig, 2016)

#### **2.2.4. Ramales secundarios**

Son los encargados de llevar la energía eléctrica a los usuarios residenciales, desde los transformadores de distribución por medio de acometidas. Se suministra el voltaje nominal de servicio. (Chanatasig, 2016)

### **2.3. Clasificación de redes de distribución acorde al entorno instalado**

De acuerdo con la ubicación del sistema, se manejan dos opciones para redes de distribución: subterráneas y aéreas, siendo las últimas las más utilizadas.

#### **2.3.1. Redes de distribución aéreas**

Constituidas principalmente por conductores de tipo desnudo, ubicados con aisladores, sobre estructuras que se montan sobre postes de hormigón de 9 y 12 metros.

En comparación con los sistemas de distribución subterráneas, se obtienen las siguientes ventajas:

- Costo inicial reducido.
- Materiales de fácil consecución.
- Mantenimiento relativamente fácil.
- Fácil localización de fallas.
- Tiempos de construcción reducidos. (Ramírez Castaño, 2009)

Mientras tanto se presentan las siguientes desventajas:

- Estéticamente no aceptable;
- Confiabilidad reducida (susceptibles a contacto de agentes externos y condiciones climáticas);
- Seguridad reducida. (Ramírez Castaño, 2009)

### **2.3.2. Redes de distribución subterránea**

Se emplean en zonas urbanas donde el esteticismo es requerido, aparte de condiciones de seguridad, para evitar que los cables atravieses o sobrepasen las edificaciones. (Ramírez Castaño, 2009)

Posee las siguientes ventajas:

- Poseen una confiabilidad más elevada que un sistema aéreo.
- Son estéticas ya que no se presentan a la vista.
- No están expuestas a vandalismo. (Ramírez Castaño, 2009)

En cambio, presenta las siguientes desventajas:

- Costo de inversión inicial elevado.
- La localización de fallos se hace más complicado.
- El mantenimiento se dificulta.

- Están expuestas a la humedad y a la acción de los roedores. (Ramírez Castaño, 2009)

## **2.4. Análisis de fallas**

Se conoce como fallas a aquellas anomalías que ponen en riesgo al sistema de distribución, los bienes materiales y la vida de las personas circundantes. Debido a estas circunstancias, el suministro de energía eléctrica debe ser detenido perdiendo así su continuidad en un lapso de tiempo no establecido. (Chanatasig, 2016)

Los tipos de fallas más comúnmente producidos son: sobrecargas, cortocircuitos, fallas de aislamiento, fusión de conductores, etc. (Chanatasig, 2016)

### **2.4.1. Sobrecarga**

Una sobrecarga es producida cuando la corriente que circula por un elemento o aparato sobrepasa su corriente nominal.

Son originadas por el consumo elevado de energía eléctrica del sistema, y desarrolla un calentamiento excesivo en los conductores, resultando en el rompimiento del aislamiento y/o ruptura de los mismos. (Chanatasig, 2016)

### **2.4.2. Cortocircuitos**

Un cortocircuito se produce cuando se ponen en contacto dos puntos de un sistema eléctrico que se encuentran a diferente potencial, dando como resultado el paso de una corriente elevada que puede destruir los conductores en el punto de falla. (Ramírez Castaño, 2009)

Los factores que determinan la magnitud de la corriente de cortocircuito en un sistema eléctrico son: la configuración del sistema y la ubicación del punto de falla. (Ramírez Castaño, 2009)

Un cortocircuito puede producirse por las siguientes causas:

- Deterioro de equipos del sistema;
- Ruptura de conductores;
- Factores atmosféricos;
- Deterioro de aisladores;
- Contacto por vegetación;
- Agentes climáticos (vientos que topan las líneas, etc.). (Ramírez Castaño, 2009)

Como resultado, los efectos de un cortocircuito pueden ser:

- Reducción de la vida útil de los equipos;
- Corrientes elevadas presentes en el sistema;
- Caídas de voltaje en los nodos circundantes a la falla;
- Discontinuidad del servicio eléctrico;
- Sobre calentamiento de equipos;
- Inestabilidad del sistema. (Ramírez Castaño, 2009)

### a. Tipos de cortocircuitos

Los tipos de cortocircuitos que pueden presentarse en un sistema eléctrico son los siguientes:

**Tabla 1**

*Tipos de fallas eléctricas*

Tipo de falla	Clasificación	Porcentaje de ocurrencia	Causas más comunes
Línea a tierra (Monofásica)	Asimétrica	85%	Agentes externos (árboles, ramas, etc.) Agentes climáticos (vientos, lluvias, etc.) Descargas atmosféricas.
Línea a línea (Bifásica)	Asimétrica	8%	Ramas y animales
Línea a línea y tierra (Difásica)	Asimétrica	5%	Ramas Errores humanos en el mantenimiento
Trifásica	Simétrica	1%	Caídas de postes. Errores de operación y mantenimiento. Accidentes de tránsito.
Trifásica a tierra	Simétrica	1%	Errores de mantenimiento.

Fuente: (Soto, 2005)

Se observa que las fallas asimétricas son las que más frecuencia poseen y las que más afectan al sistema eléctrico, pues varían los voltajes y corrientes entre fases teniendo problemas tales como:

- Corrientes no deseables y peligrosas.
- Deterioro o daño de los equipos del sistema.
- Sobrevoltajes transitorios que envuelven la integridad y confiabilidad de partes aisladas.

- Bajos voltajes en los alrededores de la falla. (Gers & Holmes, 2004)

## **2.5. Dispositivos de Protección**

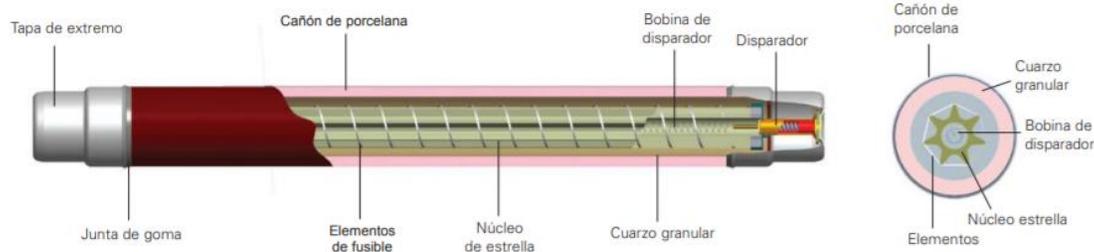
Son aquellos dispositivos que se instalan en los sistemas eléctricos, con el objetivo fundamental de detectar anomalías tales como sobrecorrientes, y desconectar el suministro de energía al punto de falla. Además permiten aislar equipos para la ejecución de su mantenimiento. (Gers & Holmes, 2004)

Los principales equipos o dispositivos de protección que se utilizan en medio voltaje se clasifican en:

- Fusibles;
- Relés;
- Disyuntores;
- Reconectores. (Gers & Holmes, 2004)

### **2.5.1. Fusibles**

Son dispositivos de protección contra sobrecorrientes; posee un elemento que se calienta proporcionalmente por el paso de la corriente y se destruye cuando la corriente supera su valor preestablecido. Un fusible se encarga de abrir al sistema eléctrico mediante la fusión del listón fusible, eliminando el arco producido y mantener abiertas las condiciones del circuito con el voltaje nominal aplicada a sus terminales. (Gers & Holmes, 2004)



**Figura 2.** Estructura de un listón fusible  
Fuente: (EATON, Powering Business Worldwide, 2014)

Fusibles mayormente utilizados en sistemas de distribución funcionan según el principio de expulsión, es decir, tienen un tubo para detener el arco, con el interior cubierto de fibra desionizada y un elemento fusible. (Gers & Holmes, 2004)

Cuando ocurre un fallo, la fibra interior se calienta cuando el elemento fusible se funde, produciendo gases desionizantes que se acumulan en el tubo. El arco es comprimido y expulsado fuera del tubo, además, el escape de gas de los extremos del tubo hace que las partículas del arco sean expulsadas, extinguiendo así el arco cuando se alcanza el cero de corriente. Los gases, y la turbulencia del tubo, aseguran que la corriente de falla no se reinicie cuando la corriente pasa por el punto cero. (Gers & Holmes, 2004)

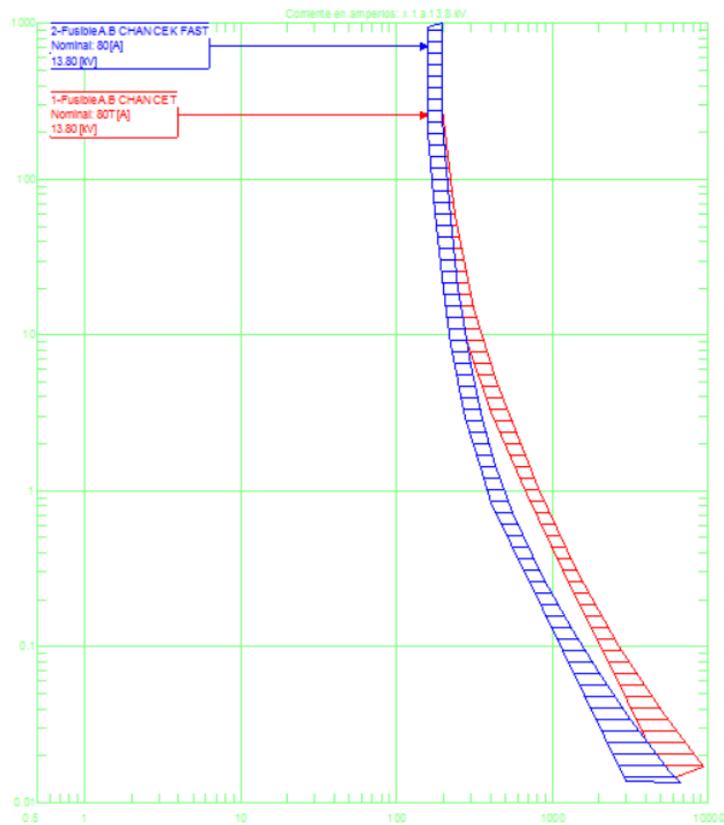
La zona de funcionamiento de un fusible está limitada por dos factores: el límite inferior que indica el tiempo mínimo de fusión del fusible, y el límite superior que indica el tiempo máximo total que tarda el fusible en eliminar el fallo. (Gers & Holmes, 2004)

En los sistemas de distribución, dependiendo de la relación de velocidad, se utilizan fusibles K y T para tipos rápidos y lentos respectivamente. La relación de velocidad es la relación entre la corriente mínima de fusión que provoca el funcionamiento del fusible a 0,1 s y la corriente mínima de fusión para 300 s. (Gers & Holmes, 2004)

La siguiente información es necesaria para seleccionar un fusible adecuado para su uso en el sistema de distribución:

1. Voltaje y nivel de aislamiento.
2. Tipo de sistema.
3. Nivel máximo de cortocircuito.
4. Corriente de carga. (Gers & Holmes, 2004)

Los cuatro factores anteriores determinan las características de la corriente nominal del fusible, el voltaje y la capacidad de cortocircuito. (Gers & Holmes, 2004)



**Figura 3.** Diferencia de fusibles tipo K (azul) y tipo T (rojo) de la misma capacidad

**a. Selección de la corriente nominal**

La corriente nominal del fusible debe ser mayor que la corriente máxima de carga continua a la que funcionará el fusible. Además, debe permitir un porcentaje de sobrecarga de acuerdo con las condiciones del equipo protegido. En el caso de transformadores de potencia, los fusibles deben seleccionarse de manera que la característica tiempo/corriente esté por encima de la curva de operación del transformador y por debajo de su límite térmico. (Gers & Holmes, 2004)

**b. Selección del voltaje nominal**

El voltaje nominal del fusible está determinado por las siguientes características del sistema:

- Voltaje máximo de fase a fase o de fase a tierra;
- Tipo de puesta a tierra;
- Número de fases (monofásico o trifásico). (Gers & Holmes, 2004)

Para seleccionar el nivel de voltaje del fusible, se deben utilizar los siguientes criterios:

1. En sistemas no conectados a tierra, el voltaje nominal debe ser igual o mayor que el voltaje máximo de fase a fase.
2. En los sistemas trifásicos puestos a tierra, para cargas monofásicas el voltaje nominal debe ser igual o superior al voltaje máximo de línea a tierra y para cargas trifásicas el voltaje nominal se selecciona en función del voltaje de línea a línea. (Gers & Holmes, 2004)

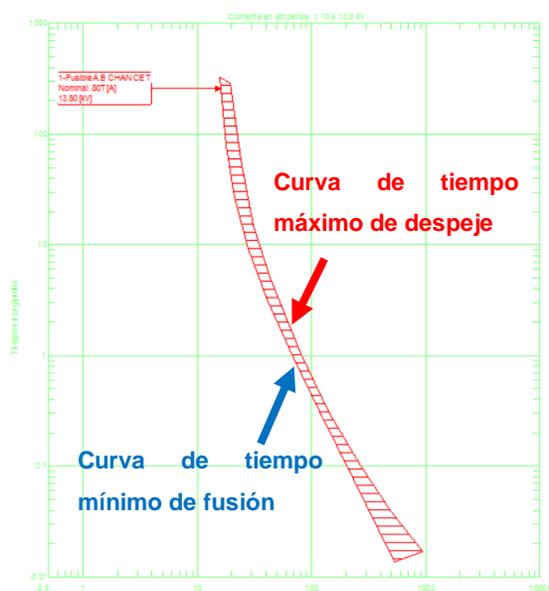
### c. Selección de la capacidad de cortocircuito

La capacidad simétrica de cortocircuito del fusible debe ser igual o mayor que la corriente de falla simétrica calculada para el punto de instalación del fusible. (Gers & Holmes, 2004)

### d. Curvas características

Los fusibles poseen tiempos de funcionamiento distintos, en base a la corriente que atraviesa estos elementos. Debido al incremento de temperatura que existe al atravesar una corriente elevada, la fusión será más rápida, es por ello que el tiempo de funcionamiento debe ser inversamente proporcional a la corriente que atraviesa en el fusible. (Chanatasig, 2016)

Las características que describen esta operación se muestran en coordenadas logarítmicas de relación “tiempo – corriente”.



**Figura 4.** Curva tiempo-corriente de un fusible

El tiempo mínimo de fusión de un fusible es aquel intervalo que existe entre el instante en que ocurre la falla y el tiempo que el fusible se rompe por fusión, resultando un arco eléctrico. (Chanatasig, 2016)

El tiempo máximo de despeje es el intervalo entre la presentación de la falla y su correspondiente extinción del arco, se representa por la adición del tiempo mínimo de fusión más el tiempo que se produce el arqueo. (Chanatasig, 2016)

## 2.5.2. Relés de sobrecorriente

Los relés de sobrecorriente, son la forma más común de protección para hacer frente a las corrientes excesivas en los sistemas de distribución. No deben instalarse únicamente como medio de protección contra sobrecargas, ya que la protección contra sobrecorrientes está destinada principalmente a funcionar en condiciones de fallo. Sin embargo, los ajustes del relé que se seleccionan son a menudo un compromiso para hacer frente tanto a las condiciones de sobrecarga como a las corrientes de falla. (Gers & Holmes, 2004)



**Figura 5.** Relé de sobrecorriente de alimentador  
Fuente: (Schweitzer Engineering Laboratories, 2017)

## **a. Tipos de relés de sobrecorriente**

### **1. Relés de corriente definida**

Este tipo de relé funciona de manera instantánea cuando la corriente alcanza el valor de ajuste. El ajuste se elige de forma que, en el punto más distante de la fuente, el relé se active con una intensidad de corriente reducida y las intensidades de operación del relé se incrementen progresivamente en cada punto, desplazándose hacia la fuente, por lo tanto, el relé con el ajuste inferior funciona primero y desconecta la carga en el punto más cercano a la falla. (Gers & Holmes, 2004)

Estas protecciones poseen una selectividad baja cuando se habla de magnitudes de corriente de cortocircuito elevadas. Como desventaja también se tiene que no se diferencia el punto preciso donde ocurre la falla cuando la impedancia entre ellos es pequeña en comparación a la fuente, lo que lleva a la posibilidad de una pobre discriminación. (Gers & Holmes, 2004)

### **2. Relés de corriente/tiempo definido o de tiempo definido**

Este tipo de relé permite variar el ajuste para hacer frente

A distintas magnitudes de corriente configurando niveles de tiempo de operación distintos. Se pueden definir para que el interruptor aledaño a la falla opere en un tiempo reducido considerable, y posteriormente, los demás actúen en sucesión usando retardos de tiempo más largos, moviéndose de vuelta hacia la fuente. (Gers & Holmes, 2004)

Debido a que el tiempo de funcionamiento de los relés de tiempo definido puede ajustarse en pasos fijos, la protección es más selectiva. La gran desventaja de este

método de discriminación es que las fallas cerca de la fuente, que resultan en corrientes mayores, pueden ser eliminadas en un tiempo relativamente largo. (Gers & Holmes, 2004)

Este tipo de relé tiene una configuración de corriente para seleccionar el valor con el que se iniciará el relé, además de una configuración de marcación de tiempo para obtener la temporización exacta de la operación del relé. (Gers & Holmes, 2004)

Se debe tener en cuenta que el ajuste del retardo es independiente del valor de la sobrecorriente necesaria para el funcionamiento del relé. Estos relés se utilizan mucho cuando la impedancia de la fuente es grande comparada con la del elemento del sistema de alimentación que se protege cuando los niveles de fallo en la posición del relé son similares a los del extremo del elemento protegido. (Gers & Holmes, 2004)

### **3. Relés de tiempo inverso**

La característica primordial de estos relés es que funcionan en tiempos inversamente proporcionales a la corriente de falla. Su ventaja es que, para corrientes muy altas, se activan en un tiempo más corto sin perder selectividad de la protección. Se clasifican acorde con su curva característica que indica la velocidad de funcionamiento; en base a esto se definen comúnmente como inversos, muy inversos o extremadamente inversos. Los relés de tiempo inverso también se conocen como relés de tiempo mínimo definido inverso o relés de sobrecorriente IDMT. (Gers & Holmes, 2004)

### 2.5.3. Reconectores

Un reconector es un dispositivo con la capacidad de detectar condiciones de sobrecorriente de fase y de fase a tierra, para interrumpir el circuito si la sobrecorriente persiste después de un tiempo predeterminado, y luego reconectarse automáticamente para volver a energizar la línea. (Gers & Holmes, 2004)



**Figura 6.** Reconector automático de MT  
Fuente: (NOJA Power, 2017)

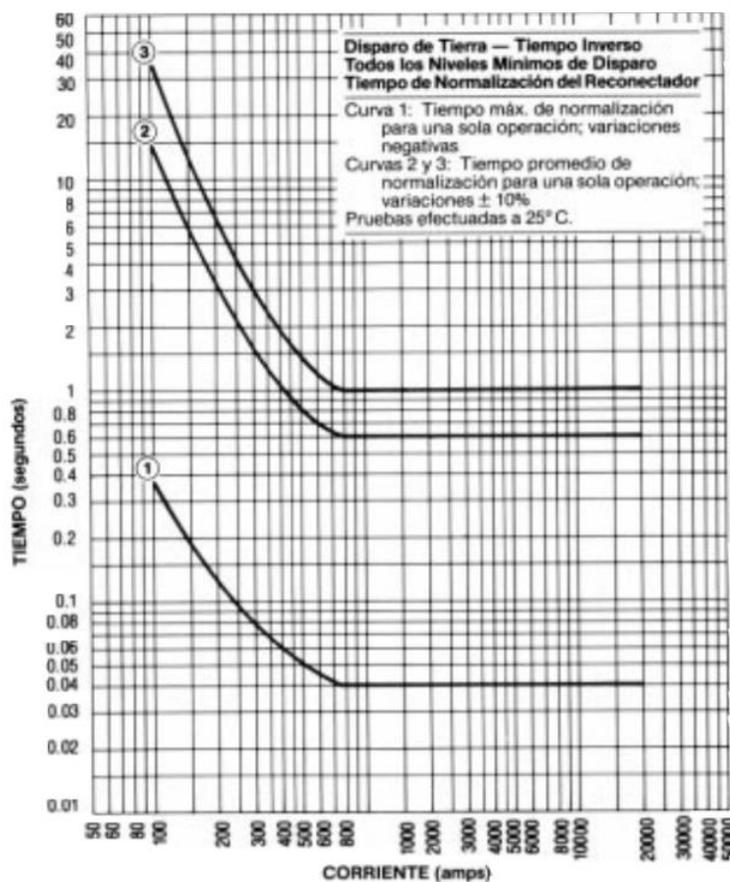
Si la falla que originó la operación persiste (falla permanente), entonces el reconector permanecerá abierto después de un número preestablecido de operaciones, aislando así la sección con falla del resto del sistema. (Gers & Holmes, 2004)

En un sistema de distribución, entre el 80 y el 95 por ciento de las fallas son temporales y duran, como máximo, unos pocos ciclos o segundos. Así, el reconector,

con su característica de apertura/cierre, evita que un circuito de distribución quede fuera de servicio por fallas temporales. (Gers & Holmes, 2004)

Típicamente, los reconectores se diseñan para tener hasta tres operaciones de apertura y cierre y, después de éstas, una operación final de apertura que bloquea la secuencia. (Gers & Holmes, 2004)

Las curvas características de tiempo/corriente de operación de los reconectores incorporan tres curvas, una rápida y dos lentas, designadas como 1, 2 y 3, respectivamente. (Gers & Holmes, 2004)



**Figura 7.** Características tiempo - corriente de un reconnector

Fuente: (COOPER Power Systems, 2008)

La coordinación con otros dispositivos de protección es importante para garantizar que, cuando se produce un fallo, se desconecte la sección más pequeña del circuito para minimizar la interrupción del suministro a los clientes. Generalmente, la característica de tiempo y la secuencia de operación del reconectador se seleccionan para que se coordinen con los mecanismos aguas arriba hacia la fuente. (Gers & Holmes, 2004)

Los reconectadores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Número de fases:** monofásico y trifásico;
- **Mecanismos de funcionamiento:** hidráulico o electrónico;
- **Medio de extinción del arco:** Aceite, vacío o SF6. (Gers & Holmes, 2004)

Los reconectadores se utilizan en los siguientes puntos de una red de distribución:

- En subestaciones, para proporcionar protección primaria a un circuito;
- En los circuitos de alimentación principales, con el fin de permitir el seccionamiento de líneas largas y evitar así la pérdida de un circuito completo debido a un fallo hacia el final del circuito; (Gers & Holmes, 2004)

Al instalar los reconectadores es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

1. Voltaje nominal del sistema.
2. Nivel de cortocircuito.
3. Corriente de carga máxima.

4. Corriente mínima de cortocircuito dentro de la zona a proteger por el reconectador.
5. Coordinación con otros mecanismos situados aguas arriba hacia la fuente y aguas abajo hacia la carga.
6. Sensibilidad de funcionamiento para faltas a tierra. (Gers & Holmes, 2004)

El voltaje nominal y la capacidad de cortocircuito del reconectador deben ser iguales o superiores a los valores en el punto de instalación. Se deben aplicar los mismos criterios a la capacidad de corriente del reconectador con respecto a la corriente de carga máxima que debe soportar el circuito. También es necesario asegurarse de que la corriente de falla al final de la línea que se está protegiendo sea detectada para causar la operación del reconectador. (Gers & Holmes, 2004)

## **2.6. Filosofía de Protecciones**

Todo sistema de protecciones, así como cada una de las protecciones que lo conforman deben satisfacer las siguientes particularidades:

### **2.6.1. Sensibilidad**

La protección debe ser capaz de detectar cualquier tipo de falla que se produzca en su zona de concesión. Debe diferenciar indistintamente las falsas alertas de fallas. Para esta característica se necesita:

- Definir para cada protección, las magnitudes mínimas de operación para diferenciar las situaciones en que se presenten fallas de las situaciones normales de funcionamiento.
- Definir las condiciones límite necesarias que evitan las situaciones de falla pero que permiten las situaciones de operación normal. (Ramírez Alanis, 2005)

### **2.6.2. Selectividad**

Es la capacidad de la protección, una vez localizada la falla, de diferenciar si la misma se produjo dentro o fuera de su área de concesión y, por tanto, entrar en funcionamiento cuando sea necesario para despejar la falla. (Ramírez Alanis, 2005)

Si la falla se produjo dentro de su área de concesión, la protección debe entrar en funcionamiento, aislando la falla; en cambio, si se ha producido fuera de su área de concesión, la protección debe permitir que las protecciones pertinentes a esa falla actúen para despejarla, o reducir, en lo posible, el número de equipos que actúen frente a la misma. (Ramírez Alanis, 2005)

### **2.6.3. Rapidez**

Tras ocurrir la falla, esta debe ser despejada lo más rápido posible. Cuanto menos tiempo se utilice para despejar la falla, menos efectos indeseados producirá en el sistema eléctrico, como: pérdida de estabilidad, daños en los equipos, riesgo para la vida de las personas. (Ramírez Alanis, 2005)

La rapidez con la que una protección actúa, depende únicamente de su construcción, sin embargo, un despeje adecuado de la falla no obliga a que las protecciones deben funcionar instantáneamente. En función de esta característica las protecciones se clasifican en protecciones instantáneas y protecciones de tiempo definido y retraso en el tiempo. (Ramírez Alanis, 2005)

#### **2.6.4. Fiabilidad**

Una protección se considera fiable cuando opera de manera adecuada y correcta, respondiendo con seguridad y efectividad ante cualquier anomalía producida. (Ramírez Alanis, 2005)

No se debe confundir entre la actuación de la protección con la respuesta de la misma. La protección observa continuamente lo que ocurre en el sistema y responde a cada instante acorde a las condiciones del mismo. En tanto, la respuesta puede abarcar la actuación como la no actuación. Fiabilidad consiste en no producir acciones innecesarias ni omitir acciones necesarias. (Ramírez Alanis, 2005)

### **2.7. Tipos de protecciones**

#### **2.7.1. Protección Primaria**

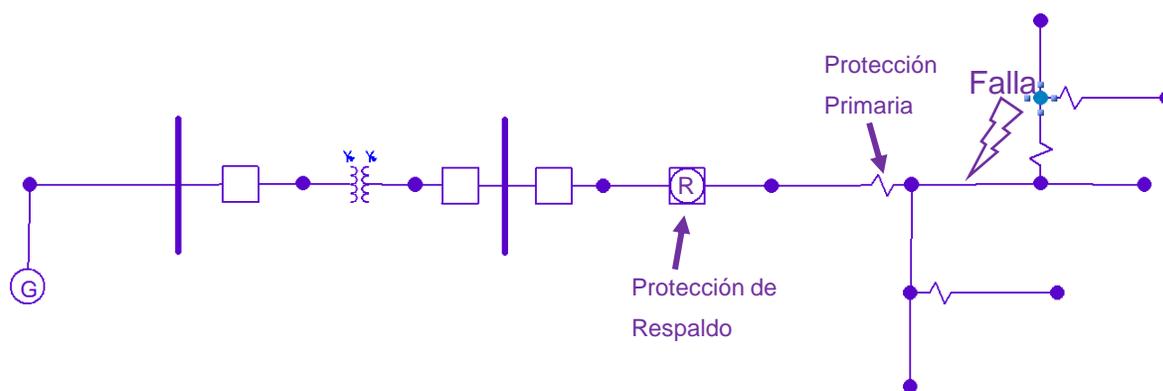
Corresponde al elemento protector cuya función primordial es proteger a los elementos que se encuentran definidos en su área de concesión, operando cuando se presenta una falla, tratando de afectar a la menor cantidad de usuarios. (Mejía & Ollague, 2012)

### 2.7.2. Protección de Respaldo

Corresponde al dispositivo protector que actúa cuando la protección primaria falla y origina la desconexión del sistema, solo puede presentarse en casos de cortocircuito. (Mejía & Ollague, 2012)

La protección primaria no actúa debido a cualquiera de los elementos siguientes:

- Ausencia de voltaje en los relés,
- Voltaje de alimentación de cc del equipo de protección,
- Relés de protección,
- Mecanismo de operación del dispositivo protector. (Mejía & Ollague, 2012)



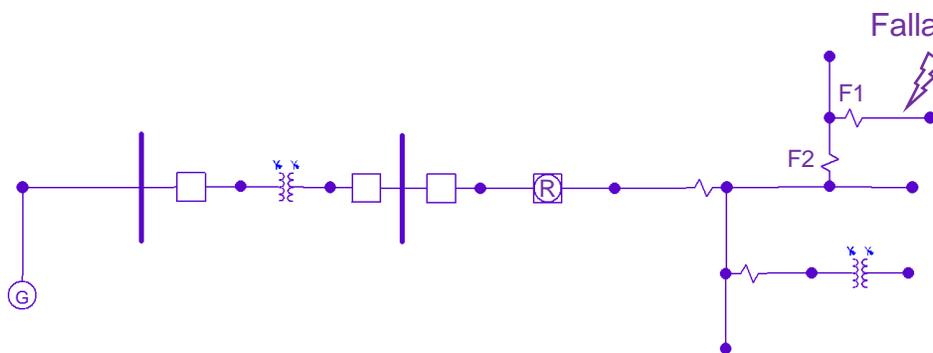
**Figura 8.** Protección primaria y protección de respaldo

## 2.8. Coordinación de protecciones eléctricas en sistemas de distribución

### 2.8.1. Coordinación fusible – fusible

La coordinación entre fusibles se debe realizar entre la curva de máximo tiempo de despeje del fusible aguas abajo vs. el tiempo mínimo de fusión del fusible aguas arriba.

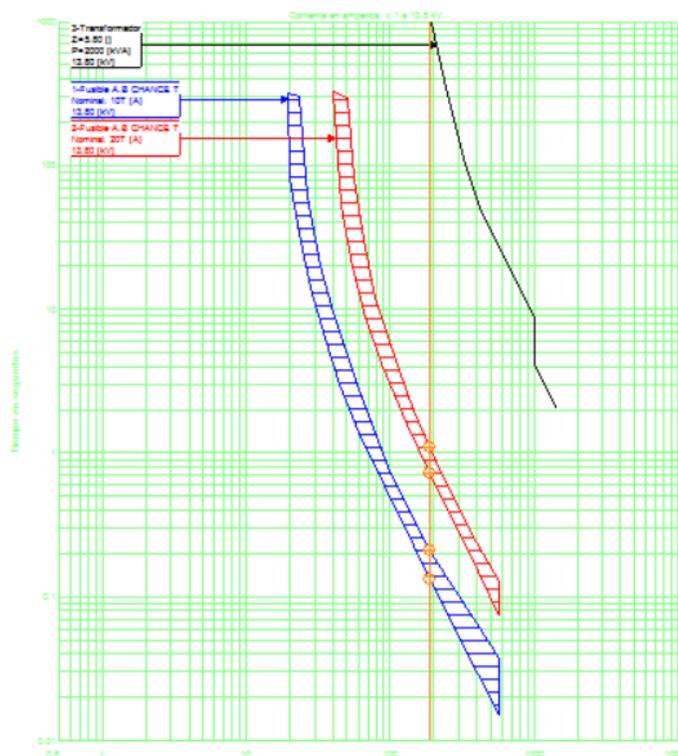
(Lara, 2014)



**Figura 9.** Coordinación fusible - fusible

Algunos criterios para coordinación (Lara, 2014), son:

- “El fusible debe permitir una corriente permanente de 1,5 veces la corriente nominal.
- El tiempo de máximo despeje del fusible protector debe ser como máximo el 75% del tiempo mínimo de fusión del fusible protegido.”



**Figura 10.** Método de coordinación fusible – fusible con  $t_1/t_2 \leq 0,75$

### 2.8.2. Fusible de expulsión – transformador

La protección de transformadores debe cumplir con algunos puntos específicos tal como:

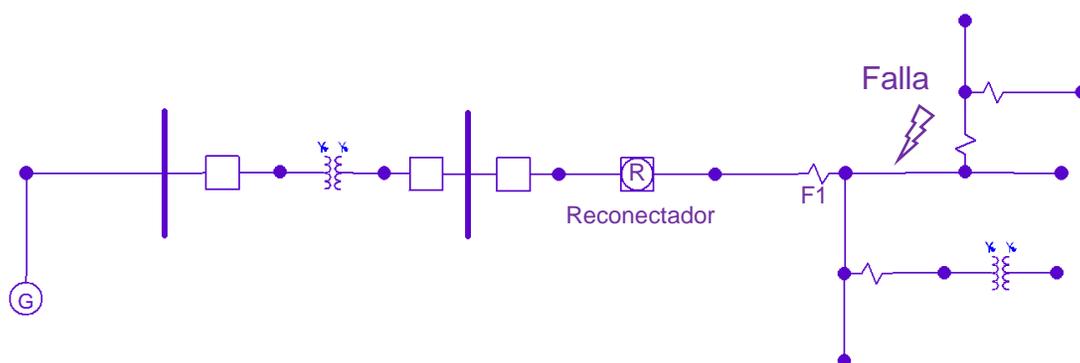
- Proteger al sistema de fallas originadas en el transformador.
- Evitar sobrecargas del transformador.
- Abrir al transformador del sistema en un tiempo reducido o limitar la cantidad de energía que atraviesa al mismo.
- Soportar sobrecargas de tiempo relativamente nulo sin alterar el funcionamiento del transformador.

- e) Soportar la corriente de entrada al transformador (Inrush) y los arranques en frío.
- f) Evitar que se alcance el límite térmico del transformador.
- g) Resistir daños por sobrecargas atmosféricas. (Lara, 2014)

### 2.8.3. Coordinación reconectador – fusible

El objetivo de esta coordinación consiste en que el fusible debe despejar las fallas permanentes que se presenten en el sistema; en cambio, el reconectador despeja únicamente las fallas temporales. (Regalado, 2003)

La coordinación de un reconectador en un sistema de distribución con un fusible, se lo realiza con el criterio de la coordinación con el fusible en el lado de carga del reconectador. (Regalado, 2003)

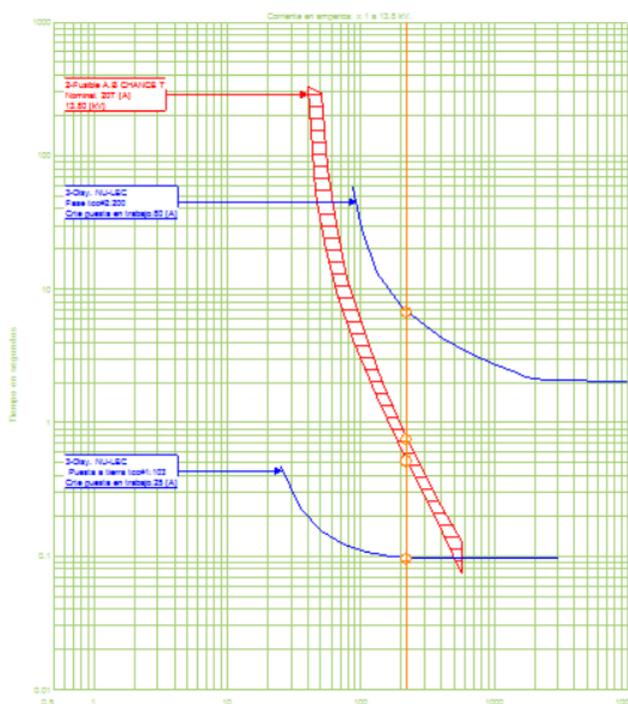


**Figura 11.** Coordinación reconectador - fusible

Para esta coordinación es necesario que el fusible opere una vez haya terminado de operar la curva rápida del reconectador, y el fusible debe ser seleccionado para que no opere en condiciones de corriente transitoria. (Regalado, 2003)

El tiempo mínimo de fusión para los valores de la falla en la zona de protección, debe ser mayor que el tiempo de despeje de la curva rápida del reconectador, indicando así que la curva característica rápida del reconectador es afectada por un factor multiplicador. Este factor está en función de la cantidad de operaciones rápidas y el tiempo de cierre del reconectador, y solamente se afecta al tiempo de operación, no la corriente. (Regalado, 2003)

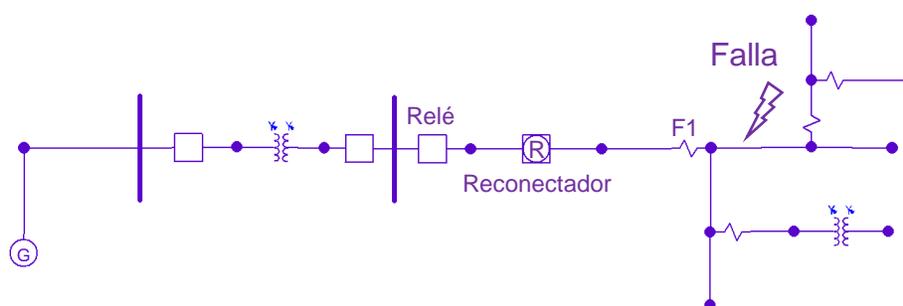
El tiempo máximo de despeje del fusible de mayor denominación de la zona de protección para todos los valores de corriente de falla, debe ser menor que la curva de despeje lento del reconectador. (Regalado, 2003)



**Figura 12.** Método de coordinación reconectador - fusible

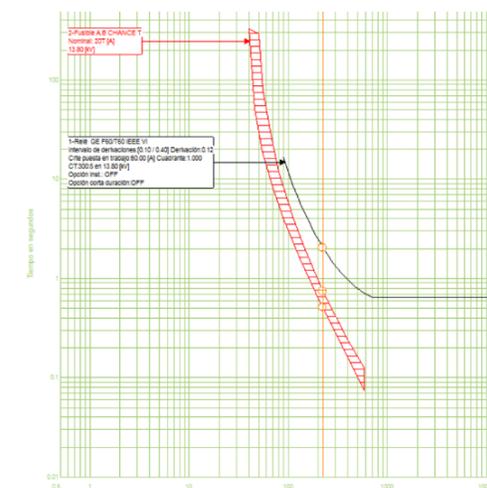
## 2.8.4. Coordinación relé – fusible

La coordinación de un relé y los fusibles de los ramales, se obtiene cuando el fusible entra en operación antes de que el relé detecte la falla. Un margen entre 0,2 y 0,3 segundos es aceptable mantener entre el tiempo de máximo despeje del fusible y la curva de tiempo inverso del relé. (Chanatasig, 2016)



**Figura 13.** Coordinación relé - fusible

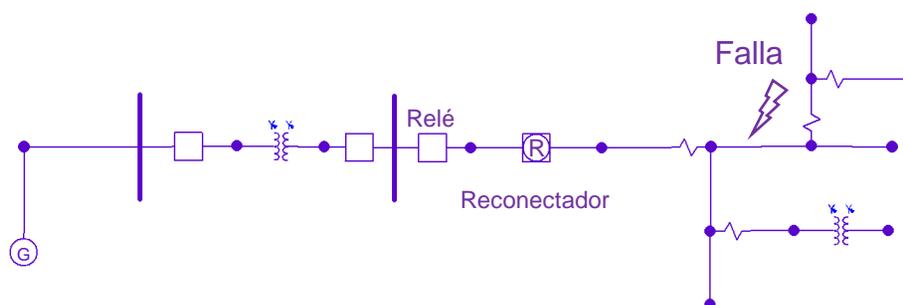
Los relés de tiempo inverso y muy inverso se pueden emplear con los fusibles de tipo expulsión, mientras que los extremadamente inverso se adaptan mejor a fusibles de tipo limitador de corriente. (Chanatasig, 2016)



**Figura 14.** Método de Coordinación relé - fusible

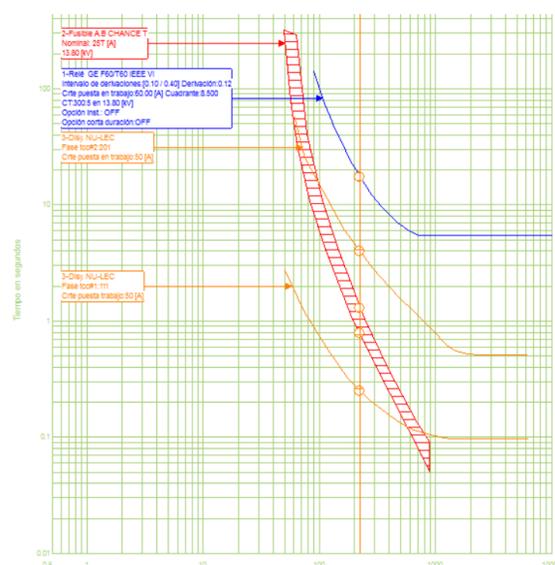
### 2.8.5. Coordinación relé – reconector

En una S/E, cuando las salidas se configuran con disyuntores accionados por relés, y se tiene presente en el sistema un reconector, la coordinación está relacionada entre el relé que manda la señal de apertura y el reconector aguas abajo. (Chanatasig, 2016)



**Figura 15.** Coordinación relé - reconector

Cuando se presenta una falla, el reconector completa su secuencia de operación, y el relé no debe entrar en funcionamiento. Por tanto, la curva de operación del relé debe estar por encima de la del reconector asociado. (Chanatasig, 2016)



**Figura 16.** Método de Coordinación relé - reconector

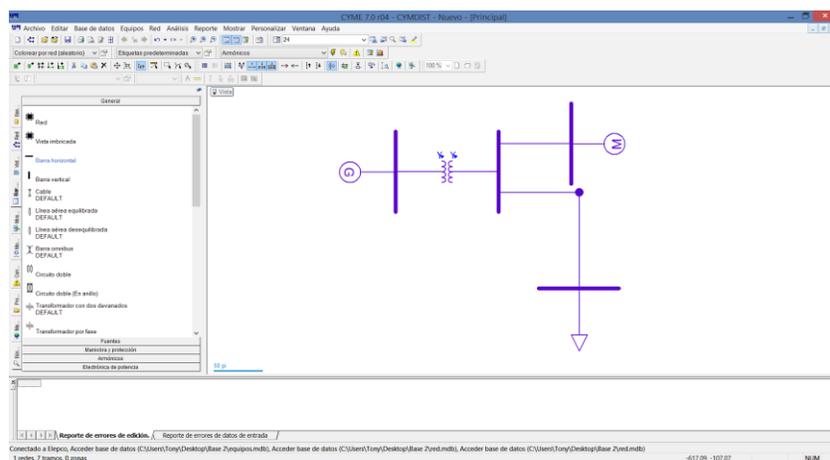
## 2.9. Software CYMDIST

El software CYMDIST es una herramienta que proporciona aplicaciones clave para realizar estudios de planificación y organización de un sistema eléctrico, simulaciones y análisis. (EATON Powering Business Worldwide, 2018)

Presenta una variedad de bibliotecas, modelos detallados y algoritmos con las mejores prácticas estándares y de la industria. Su interfaz gráfica es personalizable y proporciona la representación, resultados e informes al nivel de detalle requerido. (EATON Powering Business Worldwide, 2018)

Realiza estudios sobre:

- Flujos de carga,
- Distribución y estimación de carga,
- Análisis de fallas,
- Balance de cargas, etc. (EATON Powering Business Worldwide, 2018)



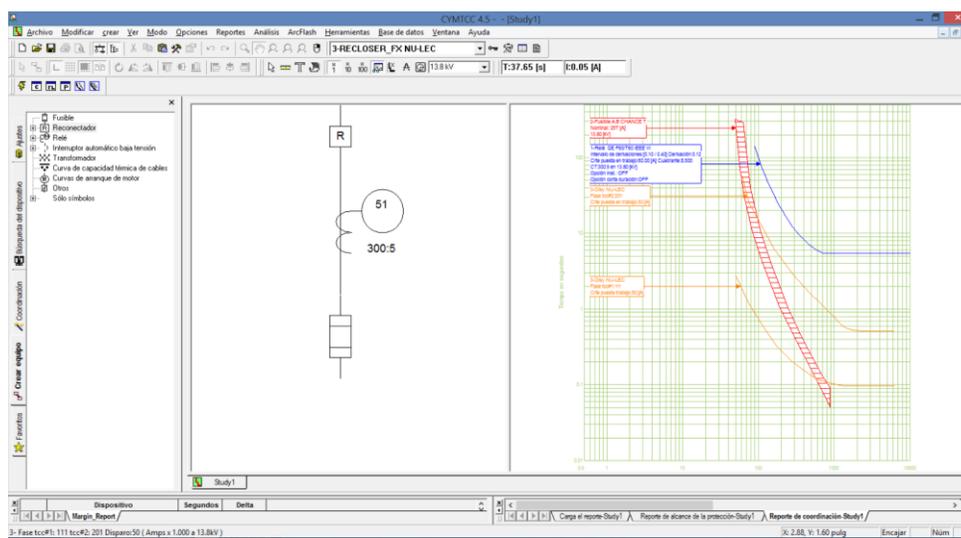
**Figura 17.** Interfaz software CYMDIST

## 2.10. Software CYMTCC

Es un potente editor que admite construir el diagrama unifilar de un sistema eléctrico. Puede generar todas las referencias requeridas de estudio como: curvas de daño de cables y conductores, curvas de arranque de motores, curvas de resistencia, etc. (EATON, Powering Business Worldwide, 2018)

Capacidades analíticas:

- Capacidad de realizar ajustes de coordinación de protecciones,
  - Seguimiento de las corrientes de falla LL y LT en transformadores delta-estrella,
  - Capacidad de medir tiempo de separación entre cada par de dispositivos,
  - Biblioteca con marcas de fabricantes reconocidos tal como: Cooper, Schweitzer, S&C, ABB, etc.
  - Selección automática de los cuadrantes de tiempo de relés según el tiempo de operación requerido,
  - Capacidad de introducir ecuaciones numéricas en todo tipo de dispositivo.
- (EATON, Powering Business Worldwide, 2018)



**Figura 18.** Interfaz software CYMTCC

## 2.11. Fundamentación Legal

La Regulación del CONELEC No. 004/01, dispone su objetivo en establecer los niveles de calidad de la prestación del servicio eléctrico de distribución y los procedimientos de evaluación a ser observados por parte de las Empresas Distribuidoras.

El objetivo del alimentador 10PJ13B2S1 está en mejorar la calidad del servicio eléctrico, con el fin de asegurar la disponibilidad del mismo en cualquier situación.

## 2.12. Hipótesis

Mediante el análisis de la red eléctrica de la S/E Pujilí, la adecuada redistribución de carga, y el estudio de fallas en el alimentador 10PJ13B2S1, se logrará la adecuada calibración y coordinación de las protecciones eléctricas del alimentador, para asegurar el suministro de energía eléctrica a los consumidores de la zona de influencia de la subestación.

### 2.13. Sistema de Variables

- **Variable Independiente:** Análisis del sistema eléctrico de la S/E Pujilí.
- **Variable Dependiente:** Redistribución de carga y coordinación de protecciones en el alimentador primario.

### 2.14. Cuadro de operacionalización de las variables

**Tabla 2**

*Operacionalización de la variable independiente*

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicador	Instrumento
<b>Análisis del sistema eléctrico de la S/E Pujilí</b>	El análisis del sistema eléctrico de una subestación, permite determinar los parámetros eléctricos para la elaboración de un modelo detallado de un alimentador, asimismo permite definir ajustes de protecciones que deberán instalarse para asegurar la disponibilidad en el servicio de energía eléctrica.	Modelamiento del nuevo alimentador	Parámetros eléctricos del alimentador	Tabla de datos. Históricos del alimentador.

**Tabla 3***Operacionalización de la variable dependiente*

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicador	Instrumento
<b>Redistribución de carga y coordinación de protecciones en el alimentador primario</b>	La redistribución permitirá aliviar el flujo de potencia a través de los alimentadores debido al aumento de usuarios que producen el aumento de carga.	Redistribución de carga al alimentador de estudio	Modelo detallado del alimentador nuevo	Diagrama unifilar del modelo.
	La coordinación de protecciones me permitirá definir los dispositivos que se instalarán en el sistema eléctrico con el fin de detectar anomalías a tiempo y ofrecer seguridad.	Coordinación de protecciones eléctricas	Resultados de coordinación y aplicación de criterios de coordinación.	Fórmulas de cálculo. Gráficas.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Modalidad de investigación**

La modalidad presente para este proyecto tendrá como base realizar tipos y estrategias de investigación, técnicas y procedimientos para la búsqueda y manejo adecuado de las variables, para determinar la solución al problema planteado. Para ello se seguirá un proceso que consta de los siguientes modelos de investigación:

- Como punto de partida, se tomará el modelo de investigación bibliográfica en el desarrollo de la conceptualización teórica por medio de referencias en diferentes fuentes de información para el desarrollo del proyecto.
- Seguidamente se opta por el modelo de investigación de campo, prueba de ello será la obtención de los datos del sistema eléctrico del alimentador.
- Finalmente se establece el modelo de investigación experimental, en el momento en que se establecen los ajustes óptimos para la coordinación adecuada de las protecciones del alimentador.

##### **3.1.1. Investigación Bibliográfica**

El proyecto inicia con la recolección de fundamentos teóricos en materiales bibliográficos, artículos científicos, revistas de carácter científico, libros y direcciones web dedicados en los que se obtiene información pertinente para la adecuada coordinación y ajuste de las protecciones eléctricas.

Los datos relevantes serán de ayuda para la evaluación de las fallas que se pueden presentar en el sistema eléctrico y la debida selección del equipo de seguridad que mitigará dichas fallas y evitar daños permanentes al sistema.

### **3.1.2. Investigación de Campo**

Se realiza un proceso estructurado, sistemático y analítico de la información relacionada con el alimentador de estudio, sus parámetros eléctricos en condiciones de falla para su posterior utilización en la coordinación de protecciones.

### **3.1.3. Investigación Experimental**

Este modelo se da en el proceso de coordinar correctamente las protecciones, ya que se tiene que elegir y ajustar debidamente al equipo protector, en base a métodos explicados con anterioridad, mediante pruebas que determinan que su operatividad concuerda con las condiciones establecidas para la protección eficiente del sistema.

## **3.2. Tipo de investigación**

### **3.2.1. Investigación Cuantitativa**

Para este tipo de investigación, se ocupan variables de magnitud medible, y en el presente proyecto, dichas magnitudes se pueden representar por valores de corriente, tiempos de operación, variación del tiempo entre dos dispositivos protectores, ajustes de parámetros numéricos de dispositivos, etc.

Información que será de suma importancia para asegurar la disponibilidad del sistema eléctrico en cuanto a la prestación continua del servicio eléctrico de la zona de concesión del alimentador de estudio.

### **3.3. Diseño de la investigación**

Mediante el procedimiento de análisis, modelación del sistema, redistribución de carga y estudio de cortocircuitos del alimentador 21 de la Subestación Pujilí perteneciente a la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, se logrará determinar los ajustes de los parámetros de las protecciones eléctricas en condiciones de operación de servicio planificada.

### **3.4. Población y muestra**

La población para el presente proyecto, se determina mediante la información de la situación actual del sistema eléctrico del alimentador en estudio y sus zonas de concesión

La muestra se define por los equipos que se encontrarán en el alimentador: 430 transformadores de distribución, 3 reconectores, relé de sobrecorriente de subestación.

### **3.5. Técnica de recolección de datos**

#### **3.5.1. Instrumentos**

Para la recopilación de datos, se obtiene información a partir de registros anteriores de ELEPCO S.A. Para la elaboración de la propuesta de investigación se utiliza el método computacional, obteniendo los parámetros eléctricos de un modelo detallado y ajustando las protecciones eléctricas adecuadas para el sistema mediante software.

#### **3.5.2. Variables cuantitativas**

En la obtención de datos, los parámetros tomados en cuenta son netamente variables eléctricas como: niveles de voltajes, potencias de transformadores, longitudes de conductores eléctricos, corrientes nominales, y demás.

#### **3.5.3. Validez y confiabilidad**

Para la validez de los resultados, los datos obtenidos para realizar el análisis se determinaron mediante resultados de estudios previos y de la situación actual de los alimentadores de la Subestación Pujilí, los mismos que fueron proporcionados por ELEPCO S.A.

### **3.6. Técnica de análisis de datos**

#### **3.6.1. Clasificación y procesado de datos**

Para el desarrollo de los análisis, se utiliza la técnica de clasificación de los datos recopilados por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, posteriormente se procesan

dichos parámetros para el desarrollo de los estudios de cortocircuitos y ajustes de protecciones eléctricas.

Los criterios de análisis se citan como:

- Obtención y clasificación de parámetros eléctricos: recopilación de información por parte de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi y clasificación de datos para el análisis de operaciones eléctricas.
- Manejo de datos: como tablas, gráficos de curvas, uso de software de distribución eléctrica CYMDIST.
- Desarrollo e interpretación de resultados: manejo adecuado de la información para la adecuada selección y ajuste óptimo de las protecciones eléctricas.

### **3.7. Técnica de comprobación de hipótesis**

#### **3.7.1. Comprobación cuantitativa**

La redistribución eléctrica de la red hacia el alimentador 21 de la Subestación Pujilí determina, por medio del análisis mediante el software CYMDIST, los valores de ajuste de las protecciones eléctricas con la información tabulada y organizada.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1. Descripción del modelo actual de la subestación

##### 4.1.1. Subestación Pujilí

La subestación de distribución Pujilí se encuentra ubicada en la zona rural del cantón del mismo nombre, y está energizada por la línea de subtransmisión San Rafael – Pujilí a un voltaje de 69kV, y pertenece al punto frontera Mulaló de ELEPCO con el Sistema Nacional Interconectado (SNI). El transformador de potencia de 5MVA de 69 a 13,8 Kv instalado en la S/E Pujilí tiene las siguientes características:

**Tabla 4**

*Descripción del transformador de la subestación Pujilí 69/13,8 kV*

<b>Fabricante</b>	<b>mitsubishi</b>
<b>Clase</b>	OA
<b>Norma Técnica</b>	ANSI – C 57.12
<b>Nivel Básico de Aislamiento (BIL)</b>	350 kV / 110 kV
<b>Altitud</b>	3000 msnm
<b>Potencia Nominal</b>	5 MVA
<b>Configuración de bobinados</b>	Dyn1
<b>Frecuencia</b>	60 Hz

Fuente: ELEPCO S.A. (2018)

En medio voltaje, la subestación posee una configuración de barra única o simple. De ésta, se obtiene 3 salidas o alimentadores primarios con un nivel de voltaje de 13,8 kV de los cuales, 2 se encuentran operativos, brindando el servicio eléctrico a los usuarios

de los sectores urbano – rural del cantón; mientras que el tercer alimentador se encuentra en reserva.

Cada salida posee su interruptor de potencia comandado por relé como el inicio del sistema de protección contra fallas o para la realización de mantenimientos programados.

Asimismo, en la subestación, se encuentra instalado otro transformador de potencia de 10/12,5 MVA a niveles de voltaje de 69/13,8 kV, mismo que será utilizado para el estudio del alimentador y cuyas características son:

**Tabla 5**

*Descripción del transformador de la subestación Pujilí 69/13,8 kV*

<b>Fabricante</b>	<b>mitsubishi</b>
<b>Clase</b>	OA/FA
<b>Norma Técnica</b>	ANSI – C 57.12
<b>Nivel Básico de Aislamiento (BIL)</b>	350 kV / 110 kV
<b>Altitud</b>	3000 msnm
<b>Potencia Nominal</b>	10/12,5 MVA
<b>Configuración de bobinados</b>	Dyn1
<b>Frecuencia</b>	60 Hz

Fuente: ELEPCO S.A. (2019)

Este transformador, en su salida en medio voltaje, posee una configuración de barra única o simple. De ésta, se obtienen 6 salidas o alimentadores primarios con un nivel de voltaje de 13,8 kV de los cuales, 1 se encuentra operativo. Al final, para esta barra se planifica la activación de la salida 21 que será el punto de partida para el análisis.



### a. Recorrido

El alimentador Pujilí – Zumbahua abarca los barrios de: Cuatro Esquinas, El Tejar, El Calvario, Guápulo Centro, Rancho Alegre, Cardón, Tres de Mayo, Jesús de Nazareth, Comuna Sumalo, Bellavista, La Merced, Comuna Cruzpamba, Cangahua de San Francisco, Cuturuvi, Isinche de Cofines, Potrerillos, Cochaloma, Santa Rosa, San Alfonso de Jigua, Huaracucha, Juigapungo, Tifoloma, Santa, Bárbara, Rumipamba, Aguallaca, Cañar, Tingo, Puchulquiza, Llano Achi, Curingu, Guayrapungo, Salamalec, Ocho de Septiembre, Chame, Huayapicha, Cochas, Sillaloma, Apagua, Quindigua, Guangaje, Tingo Loma. El alimentador suministra energía eléctrica a zonas rurales del cantón Pujilí.

### b. Ajuste de protecciones del alimentador

El relé de protección contra sobrecorrientes que presente actualmente el alimentador Pujilí – Zumbahua es un relé General Electric F-650, configurado de la siguiente manera:

**Tabla 7**

*Ajustes del relé 50/51 del alimentador Pujilí / Zumbahua*

RELÉ DE SOBRECORRIENTE GENERAL ELECTRIC F-650		
<b>FASE</b>	Pick up I>	3,5 A
	Dial Time	0,4 s
	Tipo de Curva	IAC MUY INVERSA
	Pick up I>>	20 A
	Delay Time	0,02 s
<b>TIERRA</b>	Pick up I>	0,78 A
	Dial Time	0,15 s
	Tipo de Curva	IAC MUY INVERSA
	Pick up I>>	16,5 A
	Delay Time	0,02 s

Fuente: ELEPCO S.A. (2017)

#### 4.2.2. Alimentador Pujilí Centro

Este alimentador, de configuración radial, proporciona energía eléctrica a 13,8 kV a una parte urbana – rural del cantón. Posee una longitud de 19,7 Km de línea trifásica y 43,37 Km de línea monofásica, tiene una capacidad instalada entre transformadores de distribución de 3,10 MVA como se presenta en la tabla:

**Tabla 8**

*Cantidad de capacidad instalada en el alimentador Pujilí / Centro*

TRANSFORMADOR	CANTIDAD	CAPACIDAD INSTALADA (kVA)
<b>MONOFÁSICOS (FASES)</b>	A 34	390,0
	B 35	602,5
	C 72	1085,0
<b>TRIFÁSICOS</b>	15	1025,0
	<b>TOTAL</b>	3102,5

Fuente: ELEPCO S.A. (2017)

##### a. Recorrido

El alimentador Pujilí Centro abarca los barrios de: Guápulo Centro, Cristo Rey, San Marcos, Patoa de Quevedo, Perpetuo Socorro, Isinche de San Agustín, Isinche de Alpamalag, Alpamalag de Acurios. En conclusión, el alimentador suministra energía eléctrica a partes de zona rural y urbana del cantón Pujilí.

##### b. Ajuste de protecciones del alimentador

El relé de protección contra sobrecorrientes que presente actualmente el alimentador Pujilí Centro es un relé General Electric F-650, configurado de la siguiente manera:

**Tabla 9**

*Ajustes del relé 50/51 del alimentador Pujilí / Centro*

RELÉ DE SOBRECORRIENTE GENERAL ELECTRIC F-650		
FASE	Pick up I>	1,25 A
	Dial Time	0,25 s
	Tipo de Curva	IAC MUY INVERSA
	Pick up I>>	25 A
	Delay Time	0,02 s
TIERRA	Pick up I>	1,7 A
	Dial Time	0,1 s
	Tipo de Curva	IAC MUY INVERSA
	Pick up I>>	13,5 A
	Delay Time	0,02 s

Fuente: ELEPCO S.A. (2017)

#### **4.3. Análisis de la situación actual de los alimentadores primarios**

Como resultado del análisis directo de los dispositivos de protección que conforman la actual subestación Pujilí, se concluye que los mismos se encuentran ubicados de manera inadecuada, existiendo portafusibles en el ramal principal, que afectan a la coordinación con los dispositivos aledaños.

Las ubicaciones de portafusibles en distancias muy cercanas al dispositivo aguas abajo, hacen perder la selectividad cuando ocurre una falla, ya que la impedancia del dispositivo cercano a la falla y del dispositivo aguas abajo se asemejan.

## **CAPÍTULO V**

### **PROPUESTA**

En este capítulo se realiza el modelamiento de la previsión del alimentador 21 que va a ser puesto en operación, su área de concesión y procedimiento de modelado para su análisis posterior y consecuente redistribución de carga y coordinación de protecciones en el alimentador primario 10PJ13B2S1: Alpamalag-La Merced-Isinche de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi.

#### **5.1. Datos informativos**

**Nombre del alimentador:** Alimentador 10PJ13B2S1: Alpamalag – La Merced – Isinche.

**Ubicación:** Subestación Pujilí, cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi.

##### **5.1.1. Beneficiarios**

Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ELEPCO S.A.

#### **5.2. Objetivos**

##### **5.2.1. Objetivo General**

Analizar el sistema eléctrico de la S/E Pujilí para realizar redistribución de carga y su respectiva coordinación de protecciones en el alimentador 10PJ13B2S1: Alpamalag-La Merced-Isinche, mediante el análisis de la red eléctrica por cortocircuitos para garantizar la disponibilidad del suministro eléctrico, en la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi.

### **5.2.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un análisis del sistema eléctrico existente para el estudio de cortocircuitos.
- Analizar la redistribución de carga de los alimentadores existentes para su implementación en el alimentador de estudio.
- Realizar una modelación detallada del alimentador primario de la subestación Pujilí en estudio.
- Analizar las condiciones de falla presentes en los alimentadores, que reducen el suministro de energía eléctrica de la zona.
- Realizar la configuración y calibración de las protecciones eléctricas, tomando en cuenta criterios preestablecidos y empleando sistemas computacionales.

### **5.3. Fundamentación propuesta**

La propuesta que se presenta en este capítulo está relacionada con la redistribución de carga y coordinación y ajustes de las protecciones eléctricas del alimentador Alpamalag – La Merced – Isinche de la S/E Pujilí, mediante criterios de coordinación y fórmulas para definir los ajustes de dispositivos como fusibles, reconectores y relés. Los ajustes se realizarán mediante CYMTCC y se darán a conocer los resultados de la configuración de cada elemento. Finalmente se obtienen las coordenadas logarítmicas de las secuencias de operación de los elementos ante la presencia de una falla y su verificación en los intervalos de tiempo.

#### 5.4. Diseño de la propuesta

A continuación, se define el formato a considerar de acuerdo con la propuesta:

- **Determinación de la metodología de redistribución de carga:** Se tiene que determinar los usuarios que serán desplazados hacia el alimentador de estudio, para asegurar la disponibilidad de la energía eléctrica suministrada.
- **Determinación la metodología de coordinación:** Antes de iniciar con la coordinación, se debe proponer la metodología la cual nos permite poner las pautas principales para comenzar a coordinar, ejemplo de esto será no poner protecciones en el ramal principal o disminuir el número de equipos que se instalen el dicho ramal.
- **Determinación la protección de transformadores:** Mediante este punto de inicio, se empieza a seleccionar los dispositivos que actuarán en caso de fallas cercanas a los transformadores, ya que estos equipos son susceptibles de fallas. Su metodología vendrá dada mediante la protección guiada por la línea de daño y de corriente de Inrush del transformador.
- **Selección de equipos de protección:** Se seleccionan las protecciones eléctricas desde aguas abajo, hasta la fuente, respetando los criterios de coordinación correspondientes, obteniendo así una filosofía de protección adecuada y óptima.

- **Resultado:** Modelo redistribuido y determinación de parámetros y ajustes de las protecciones eléctricas obteniendo seguridad y disponibilidad en el suministro de energía eléctrica.

## **5.5. Redistribución de carga de los alimentadores**

Cuando se habla de redistribuciones de carga, el objetivo primordial es aliviar el flujo de potencia a través de un alimentador. Como se ha hablado anteriormente, el aumento de usuarios y, por consecuencia, el aumento de carga, produce la necesidad de trasladar a usuarios de los alimentadores existentes, hacia una nueva salida, con la finalidad de asegurar óptimamente el servicio continuo de energía eléctrica, sin alteraciones en el sistema eléctrico.

Es por ello que se va a modelar la nueva propuesta del alimentador 10PJ13B2S1, cuya zona de influencia estará dirigida al sector rural sur oriental del cantón Pujilí, terminando así el modelo redistribuido adecuadamente para su futura implementación.

## **5.6. Modelamiento del alimentador 10PJ13B2S1 mediante CYMDIST**

### **5.6.1. Parámetros del sistema**

Para iniciar el modelamiento y estudio del nuevo alimentador, se procede a la configuración de los parámetros fundamentales del sistema tal como:

- Frecuencia,
- Potencia base
- Voltaje base

- Temperatura exterior, etc.

Parámetros del sistema

Parámetros del sistema

Frecuencia del sistema: 50,0 Hz

Potencia de base: 100,0 MVA

Tensión de base: 120,0 V

Temperatura exterior: 77,0 °F

Parámetros de cálculo de la línea

Resistencia del conductor: R@25°C

Resistividad promedio de tierra: 100,0 Ohmios-m

Modelo de retorno por tierra: Infinito y uniforme

Modelo de cable y de línea equilibrada: PI nominal

Para tramos más largos que: 155,3 mi

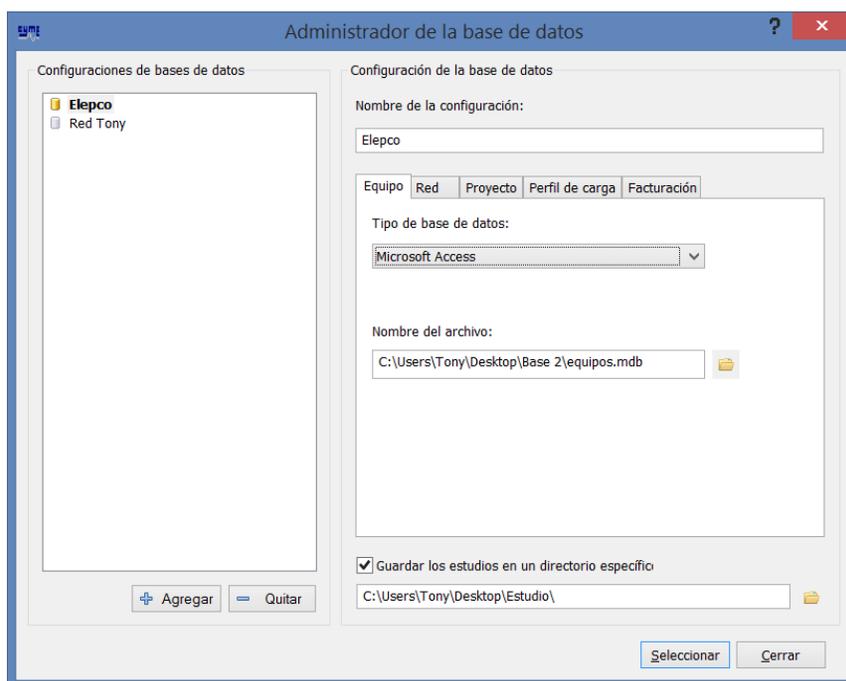
Guardar Aceptar Cancelar

**Figura 20.** Configuración de parámetros fundamentales del sistema

### 5.6.2. Implementación de la base de datos de equipos

CYMDIST permite crear la base de datos de los equipos que serán utilizados en el modelamiento del sistema, solicitando las características de toda clase de elementos eléctricos, por ejemplo: cables, líneas aéreas, conductores, transformadores, generadores, motores, cargas; además de poseer una biblioteca para equipos de protección como fusibles, reconectores, etc.

La base de datos requerida para la implementación del modelo del alimentador se creó con el nombre de “Elepco”.



**Figura 21.** Implementación de la base de datos "Elepco"

### 5.6.3. Modelación de los equipos

#### a. Fuentes

Las fuentes son los equipos primordiales en la red, ya que representan la impedancia equivalente de todo el sistema. Se modelará el lado de medio voltaje del alimentador 10PJ13B2S1, es decir, la barra de 13,8 kV.

Para la modelación de las fuentes, es necesario ingresar:

- Voltaje nominal,
- Voltaje de servicio,
- Capacidad nominal,

- Disposición de la fuente (delta o estrella),
- Impedancias del equivalente (en ohmios o en p.u.).

**Figura 22.** Datos del equivalente de fuente del alimentador 10PJ13B2S1

Para las impedancias equivalentes de fuente, se tienen que ingresar las potencias de cortocircuito  $3\emptyset$  y  $1\emptyset$ , y la relación  $X/R$ . Dichos datos se obtuvieron gracias al Departamento de Planificación de ELEPCO S.A.

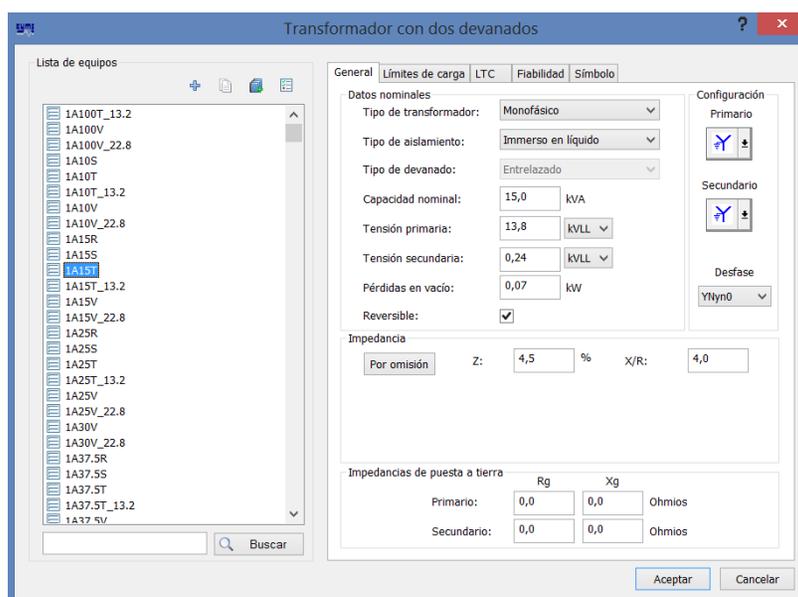
	MVA	X / R
Trifásicos:	52,27	18,0288
Monofásicos:	57,72	18,0288

**Figura 23.** Ingreso de potencias de cortocircuito y la relación  $X/R$  de la fuente

## b. Transformadores

Para modelar un transformador es necesario ingresar los siguientes datos:

- Tipo de transformador,
- Tipo de aislamiento,
- Capacidad nominal,
- Voltaje en el devanado primario,
- Voltaje en el devanado secundario,
- Pérdidas en vacío,
- Configuración y desfase,
- Impedancias (de secuencia en caso trifásico).



**Figura 24.** Modelación de transformadores (monofásico)

### c. Conductores

Es un elemento fundamental para la modelación del sistema eléctrico, y los parámetros que se necesitan ingresar son los siguientes:

- Palabra código (código mundial del cable),
- Tipo de construcción,
- Material,
- Medidas del cable (tamaño, diámetros internos y externos, RMG),
- Capacidad nominal,
- Resistencia del cable a 25 y 50°C.

Conductor			
General			
Detalles de construcción			
Palabra código:	QUA1		
Tipo de construcción:	Conductor de aluminio reforzado con acero		
Material:	Aluminio		
Tamaño:	67,44	mm <sup>2</sup>	
Diámetro interno:	0,37851	cm	
Diámetro externo:	1,13538	cm	
RMG:	0,15545	cm	
Capacidad nominal			
Crte perman. nominal:	270,0	A	
Capac. de soporte de cc:	300,0	A	
Resistencia			
	ac	cc	
R 25°C:	0,4387	0,0	Ohmios/km
R 50°C:	0,5561	0,0	Ohmios/km

**Figura 25.** Modelamiento del cable AWG 2/0

Para la obtención de los datos necesarios de los cables, se utilizó el catálogo de conductores desnudos de aluminio reforzado con acero del fabricante Westinghouse Electric Corporation.

**Tabla 10**

*Características de los conductores ACSR*

CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES ACSR							
CÓDIGO	CALIBRE	CAPACIDAD NOMINAL (A)	DIÁMETRO EXTERNO (cm)	DIÁMETRO INTERNO (cm)	RMG (cm)	R a 25°C (Ω/km)	R a 50°C (Ω/km)
PENGUIN	ACSR-4/0 AWG	340	1,43002	0,47701	0,24811	0,2765	0,3679
PIGEON	ACSR-3/0 AWG	300	1,27508	0,42471	0,18291	0,348	0,4493
QUAIL	ACSR-2/0 AWG	270	1,13538	0,37851	0,15545	0,4387	0,5561
RAVEN	ACSR-1/0 AWG	230	1,01092	0,33711	0,13594	0,5518	0,6959
SPARROW	ACSR-2 AWG	180	0,80264	0,26721	0,12741	0,8761	1,0501
SWAN	ACSR-4 AWG	140	0,65278	0,21184	0,1331	1,3919	1,5969

Fuente: (Westinghouse Electric Corporation, 1965)

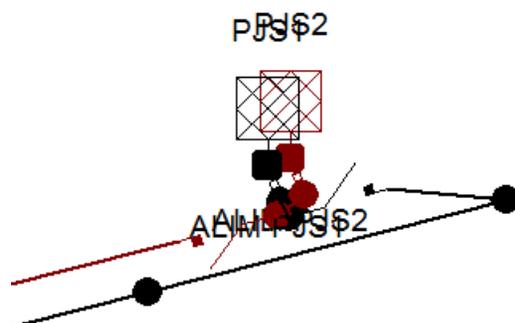
## 5.7. Modelación del alimentador redistribuido

### 5.7.1. Modelo actual

El modelo de los alimentadores de la S/E Pujilí está realizado con la información proporcionada por el departamento de Centros de Información para Estudios Técnicos (CIETEC), mediante el cual se obtiene datos geo-referenciados de los elementos presentes en la red como: conductores, postes, transformadores, etc.

El manejo de este diseño está basado únicamente en los dos alimentadores que se encuentran actualmente operativos, por lo que es necesario realizar la redistribución de

la carga para efectuar los estudios en el área de concesión planificada para el nuevo alimentador.



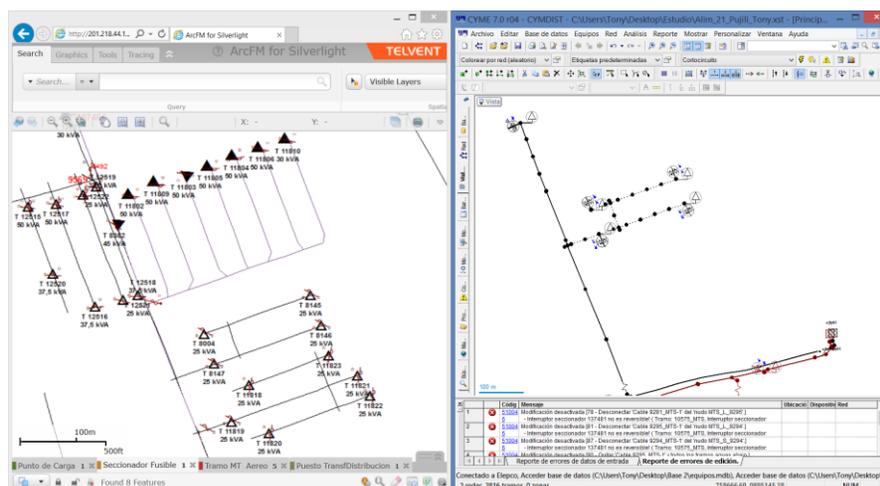
**Figura 26.** Fuentes de la S/E Pujilí con dos alimentadores activos

### 5.7.2. Modelo Redistribuido

Como es detallado, el objetivo de este proyecto es realizar la redistribución de carga para el alimentador reservado, por ello, gracias al Departamento de Dirección Técnica, se ha realizado una planificación previa del área de concesión del alimentador, quedando un recorrido que sigue: Cristo Rey, Tres de Mayo, Rumipamba, San Juan de Agua Santa, Capuliespamba, Isinche Grande, Cachi Bajo, Santa Bárbara, Jesús de Nazareth, Bellavista, La Merced, Cruzpamba, Juigapungo, Santa Rosa, Huaracucha, Isinche de Cofines, Isinche de Alpamalag.

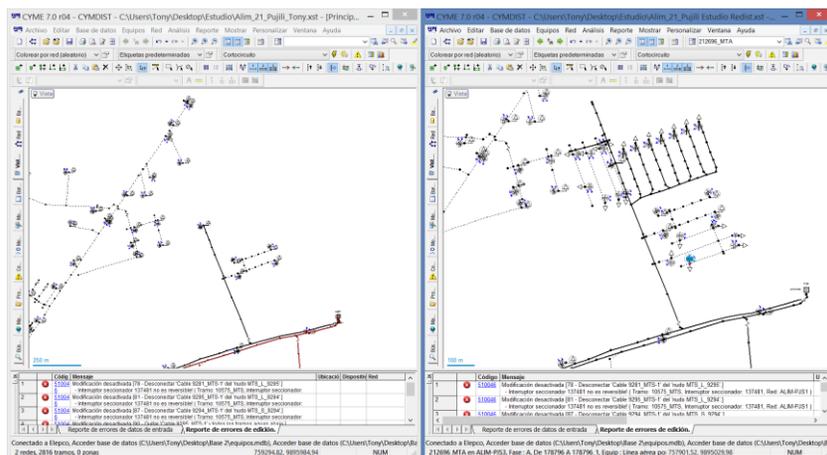
Con los límites definidos del alimentador, se procede a modelarlo con el software CYMDIST, creando tramo a tramo, describiendo el tipo de conductor, la localización geográfica, su longitud, de igual manera implementando los transformadores y cargas correspondientes.

Para la actualización de la red, se hace uso del Geoportal Web de ELEPCO S.A., el cual nos ofrece datos en tiempo real de los equipos que conforman los alimentadores. Para el año en curso y la planificación requerida del alimentador, se actualizaron ramales, postes, puestos de transformación y de carga.



**Figura 27.** Comparación modelo S/E Pujilí actual (izquierda) vs. modelo CYMDIST (derecha)

Como se mencionó en el modelamiento de datos de equipos, se ingresaron los datos correspondientes de cada uno de los elementos actualizados, mediante la información del Geoportal.



**Figura 28.** Actualización de la zona de concesión Cristo Rey

El modelo final del alimentador 10PJ13B2S1 se puede observar en el **Anexo 1**

## 5.8. Análisis de cortocircuitos

Al realizar el análisis de cortocircuitos, se puede determinar las magnitudes de corrientes de falla, los mismos que son de vital importancia para la coordinación de protecciones del alimentador.

Mediante el estudio de cortocircuitos en CYMDIST, se puede obtener datos para realizar las siguientes operaciones:

- Seleccionar los elementos de protección necesarios,
- Determinar los ajustes de las protecciones,
- Determinar la magnitud de las corrientes de falla en diferentes puntos del sistema.

### 5.8.1. Resultados del estudio del Cortocircuito

**Tabla 11**

*Cuadro resumido de análisis de cortocircuitos del alimentador*

Alimentador: Alpamalag – La Merced – Isinche						
Nombre Alim.	Nombre tramo	Fase	LLL (A)	LLT (A)	LL (A)	LT (A)
ALIM-PJS3	102411_MTA	ABC	2183	2320	1891	2408
ALIM-PJS3	103684_MTA	ABC	2063	2152	1783	2176
ALIM-PJS3	104323_MTA	ABC	1859	1874	1603	1808
ALIM-PJS3	30298_MTA	ABC	1829	1841	1576	1763
ALIM-PJS3	29687_MTA	ABC	1330	1250	1141	1120
ALIM-PJS3	77786_MTA	ABC	1498	1441	1288	1312
ALIM-PJS3	30824_MTA	ABC	1000	939	858	794
ALIM-PJS3	30315_MTA	ABC	1483	1419	1275	1293
ALIM-PJS3	30276_MTA	ABC	1656	1627	1426	1515
ALIM-PJS3	77946_MTA	ABC	916	861	786	718
ALIM-PJS3	77934_MTA	ABC	1040	972	892	830
ALIM-PJS3	78022_MTA	ABC	1011	946	867	803
ALIM-PJS3	80791_MTA	ABC	922	866	791	723
ALIM-PJS3	80949_MTA	ABC	758	717	651	583
ALIM-PJS3	107527_MTA	ABC	692	656	593	528

Estos resultados, serán de gran importancia en la selección y ajuste de los equipos de protección que se detallarán más adelante. En el Anexo 4 se presenta el cuadro general del análisis de cortocircuitos del alimentador.

### **5.9. Metodología de coordinación**

Para la coordinación de protecciones, se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Obtener la información necesaria sobre el alimentador a proteger, indicando las características fundamentales de los dispositivos de protección y las redes.
- Calcular las máximas y mínimas corrientes de cortocircuito en diferentes puntos del primario.
- Realizar el procedimiento de coordinación desde la carga hacia la fuente.
- Seleccionar el dispositivo y ajustar las protecciones, acorde a lo dicho en el segundo capítulo, cumpliendo así la filosofía de protección descrita.

### **5.10. Procedimiento de coordinación**

Para la coordinación del alimentador, se procede a seccionar al mismo en zonas independientes, con el objetivo de aislar dichas secciones de sus adyacentes cuando se produce una falla, de manera que las demás secciones queden operativas. Para seleccionar los puntos de coordinación del sistema, se tienen en cuenta algunas consideraciones:

- En el troncal principal, se debe reducir el número de dispositivos protectores, con el objetivo de poder coordinar las protecciones en los diferentes ramales que derivan del mismo, logrando así una mayor selectividad de los equipos.
- Para aislar las fallas permanentes, los fusibles se instalarán en ramales que posean una carga significativa.

- El interruptor de potencia de la S/E debe poseer sensibilidad a las corrientes mínimas de falla del sistema, operando ante una falla permanente en caso de que el fusible responsable no lo haga.
- El ajuste del relé se lo hace por el criterio del lado de carga, esto es, que su curva esté por encima de las curvas de los fusibles y del reconectador, y por debajo de la curva de daño del transformador, no se tiene reconexión en la cabecera.
- Las protecciones deben operar de tal manera que se aíslen las fallas temporales en intervalos reducidos de tiempo, sin cortar el suministro continuo de energía. Esto debido al criterio de que el 70 u 80% de fallas son temporales.

### **5.11. Selección de fusibles**

Para la selección de los fusibles, se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Voltaje nominal.
2. Nivel máximo de cortocircuito.
3. Corriente nominal de carga.

Se debe escoger el fusible acorde a la corriente de carga que éste puede soportar. Éstos están definidos por una tabla de la norma EEI – NEMA para fusibles de distribución que se detalla a continuación.

**Tabla 12**

*Denominación EEI-NEMA y corrientes nominales de fusibles tipo K y T*

Tipo K y T	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	65	80	100	140	200
<b>Amperes</b>	9	12	15	18	23	30	38	45	60	75	95	120	150	190	200

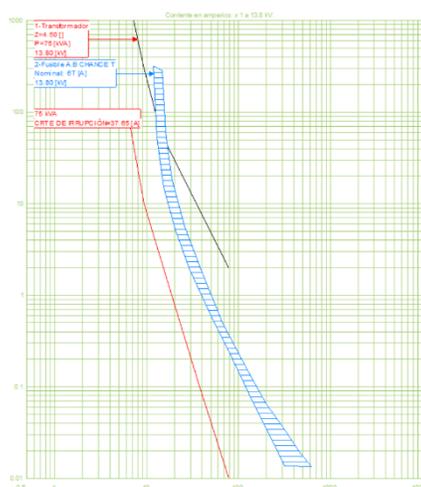
Fuente: (Ramírez Castaño, 2009)

## 5.12. Coordinación de protecciones del alimentador Alpamalag – La Merced – Isinche de la S/E Pujilí

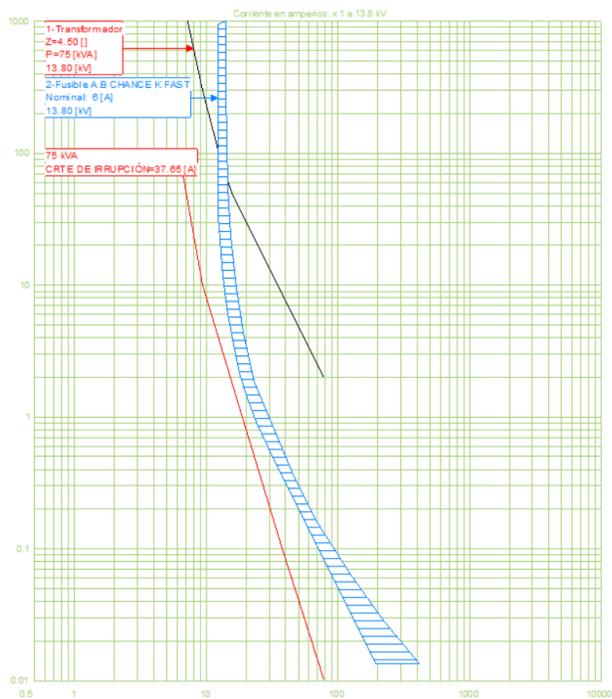
### 5.12.1. Fusibles para bancos de transformación

Una adecuada protección de transformadores se lo realiza con fusibles de tal manera que la curva tiempo – corriente del fusible, esté por debajo de la curva de daño, y por encima de la curva de magnetización (Inrush) del transformador.

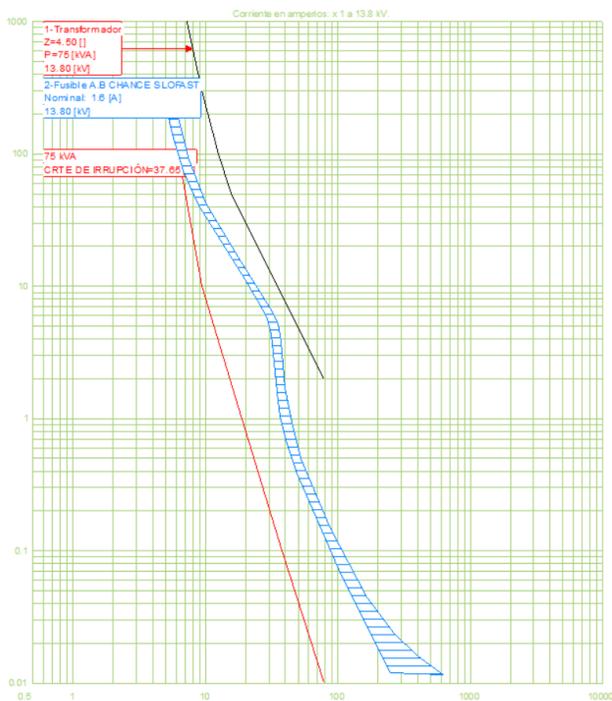
Para la selección de los fusibles que protegerán a los transformadores, se tiene tres tipos que se utilizan en media tensión: los tipos “K” (rápidos), “T” (lentos) y “SF” (Slow-Fast / Lento-Rápido), los cuales presentan diferentes curvas características.



**Figura 29.** Protección de un transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo T



**Figura 30.** Protección de un transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo K



**Figura 31.** Protección de transformador de 75 kVA - 3Ø con un fusible tipo SF

Como se puede observar, el fusible tipo “SF” es el que mejor protege al transformador contra fallas, ya que cumple todas las características, sin embargo, se hace una comparación con su equivalente en tipo T como sigue:

**Tabla 13**

*Protección de transformadores 1Ø con fusibles tipo T y SF*

Transformador 1Ø (kVA)	In (A)	Fusible T	Fusible SF
5	0,628	1T	0,2
10	1,255	2T	0,4
15	1,883	2T	0,6
25	3,138	3T	1,0
37,5	4,707	6T	1,6
50	6,276	6T	2,1

**Tabla 14**

*Protección de transformadores 3Ø con fusibles tipo T y SF*

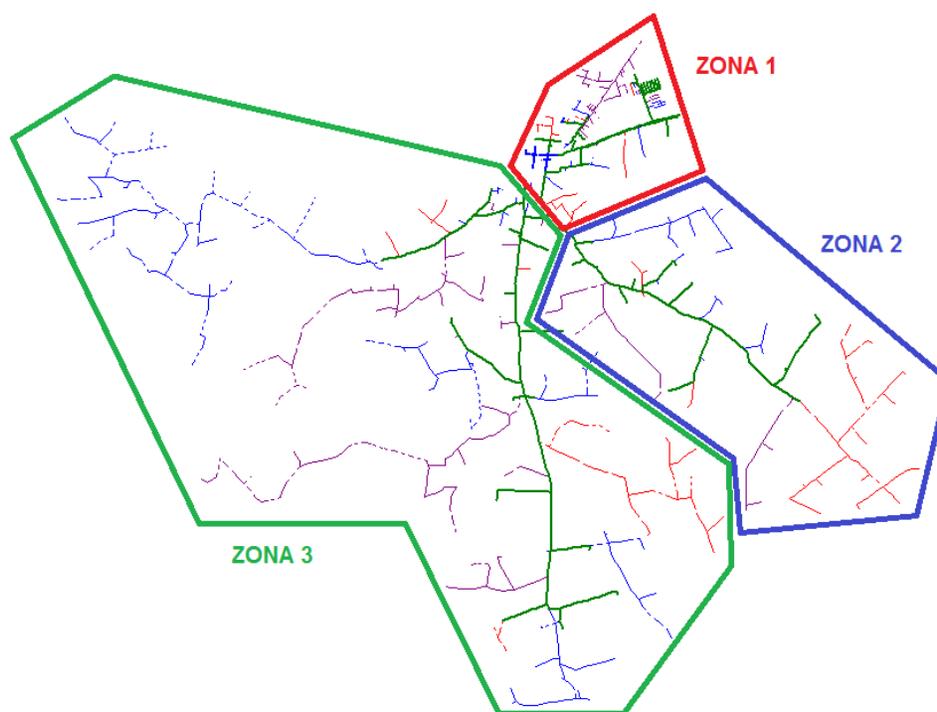
Transformador 3Ø (kVA)	In (A)	Fusible T	Fusible SF
30	1,255	2T	0,7
45	1,883	3T	1,3
50	2,092	6T	1,4
60	2,510	6T	1,6
75	3,138	6T	1,6
100	4,184	6T	2,1
112,5	4,707	6T	3,1
120 – 125	5,020	8T	3,1
150	6,276	10T	3,5
250	10,459	12T	7,0

En conclusión, sería recomendable instalar fusibles de tipo SF para la protección de los transformadores, ya que existe variedad para cada uno.

### 5.12.2. Coordinación y ajuste de fusibles en los ramales del alimentador

Como se menciona anteriormente, la selección de los fusibles y su coordinación se lo realiza desde el último dispositivo del ramal hacia la fuente, e ingresando las magnitudes de las corrientes de cortocircuito.

Para realizar una coordinación eficiente, se ha dividido al alimentador en diferentes zonas de coordinación como se presentan en la siguiente figura.



**Figura 32.** Zonas de coordinación alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche

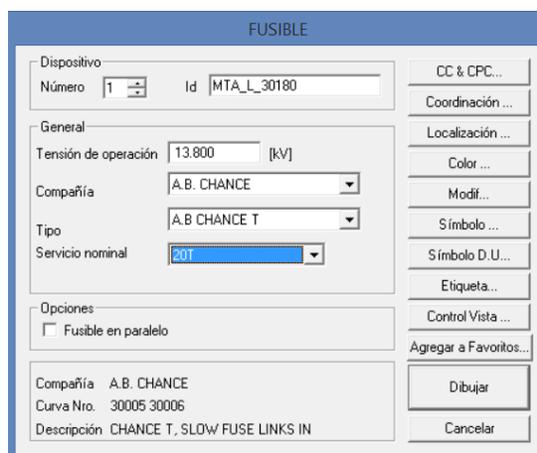
#### a. Coordinación Zona 1

Se han seleccionado 20 puntos de coordinación entre ramales monofásicos y trifásicos, la coordinación se realizó acorde con las corrientes de cortocircuito mínimas y

máximas y los fusibles que se instalarán aguas arriba se seleccionaron cumpliendo la regla  $t1 < 0,75 t2$ .

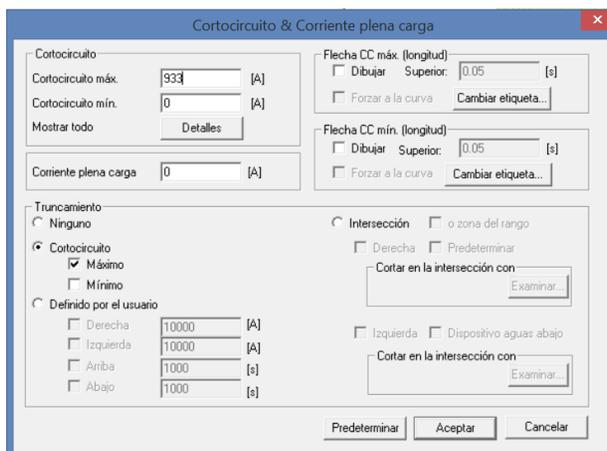
Se tomará un ejemplo del procedimiento de coordinación de protecciones, al fusible a instalar en MTA\_L\_30180 cuyo fusible para protección de su área de concesión resultó de 20T, con uno aguas arriba a instalarse en MTA\_L\_30212:

1. Se inserta un fusible y se ingresan las características fundamentales acorde al programa CYMTCC, luego dar clic en CC&CPC (cortocircuito y plena carga).



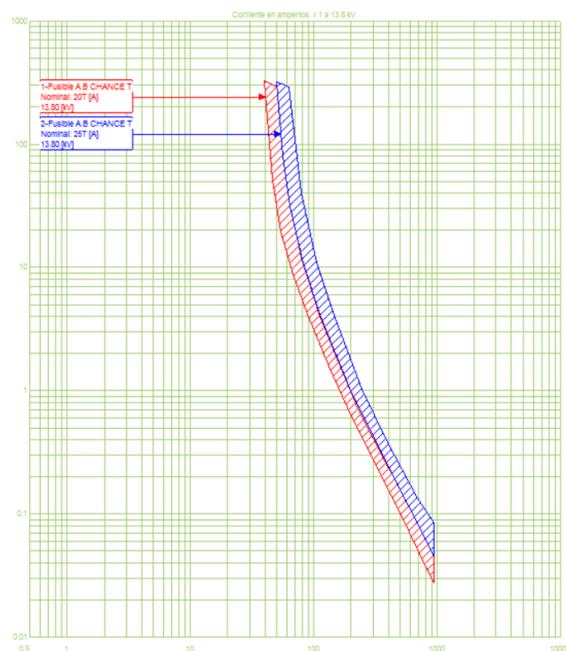
**Figura 33.** Selección del fusible 20T

2. En la pestaña que se despliega, se ingresa la información de la corriente de cortocircuito del fusible protector (en este caso del MTA\_L\_30180) en el programa CYMTCC.



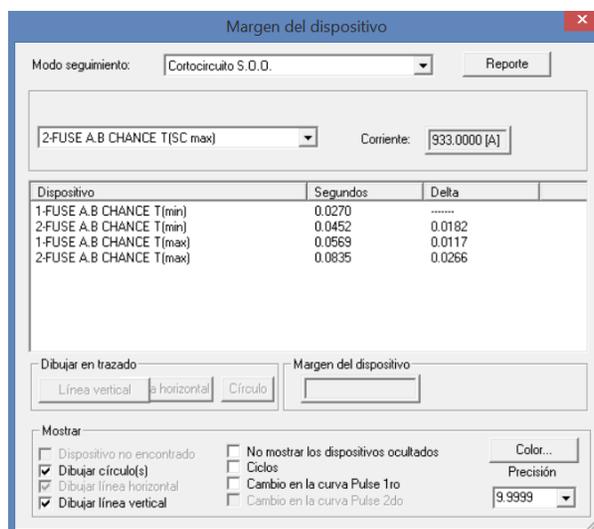
**Figura 34.** Ingreso de la corriente de cortocircuito del fusible 20T

- Una vez dibujado, se selecciona otro fusible y se ingresan las mismas características de corriente de cortocircuito. En este punto, se empieza a escoger los fusibles inmediatos superiores para realizar la coordinación. Para este ejemplo se tomará un fusible 25T, que es el inmediato superior de 20T.



**Figura 35.** Coordinación de fusibles 20T y 25T

4. Se da clic en Margen de Dispositivo  y seguidamente se escoge Cortocircuito S.O.O., para determinar la relación entre el tiempo mínimo de despeje del fusible protegido y el tiempo máximo de fusión del fusible protector.



**Figura 36.** Resultado de tiempo de respuesta de fusibles a la corriente de falla

5. Como se puede observar en la Figura 35, el fusible 1 es el protector y el 2 el protegido, por tanto, se calcula la relación entre los tiempos acordados, y no debe superar el 75% entre ambos.

$$\frac{0,0569}{0.0452} * 100 = 125,88\%$$

6. Como se puede observar, esta coordinación es inadecuada, por tanto, se ejecutan los pasos del 1-5 nuevamente con el fusible inmediato superior, que en este caso es 30T.

$$\frac{0,0569}{0.0775} * 100 = 73,42\%$$

7. Este fusible si respeta el criterio de coordinación de menos del 75% entre los tiempos respectivos de cada fusible, por tanto, el fusible a instalar en MTA\_L\_30212 es 30T.

Una vez realizado este procedimiento en los 19 puntos de coordinación de la zona 1, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 15**

*Coordinación de fusibles de la zona 1 del alimentador*

Nombre del nodo	Fusible a instalar	Capacidad Nominal Fusible (A)	Fase	Icc LLL (A)	Icc LLT (A)	Icc LL (A)	Icc LT (A)	Coord X	CoordY
MTA_L_30616	12T	18	B	-	-	-	542	761794,55	9888865,84
MTA_L_30656	12T	18	B	-	-	-	534	762145,32	9888748,16
MTA_L_30671	12T	18	B	-	-	-	557	761790,48	9889264,73
MTA_L_30703	15T	23	A	-	-	-	720	760138,54	9890855,46
MTA_L_30766	15T	23	A	-	-	-	811	759327,88	9891411,66
MTA_L_30519	15T	23	ABC	840	793	721	653	760651,12	9890236,76
MTA_L_30725	15T	23	B	-	-	-	683	759150,49	9890148,84
MTA_L_30541	15T	23	C	-	-	-	621	760863,48	9889859,83
MTA_L_30752_1	20T	30	ABC	1110	1038	953	896	758747,92	9891633,92
MTA_L_30772	20T	30	ABC	1174	1095	1008	959	7581951,94	9891951,03
MTA_L_30794	20T	30	ABC	1236	1151	1061	1021	757881,41	9891842,10
MTA_L_30800_1	20T	30	ABC	1219	1136	1046	1003	758063,89	9891924,86
MTA_L_30180	20T	30	A	-	-	-	933	758682,46	9893062,55
MTA_L_30793	20T	30	B	-	-	-	946	758240,70	9891999,25
MTA_L_30098	20T	30	C	-	-	-	1022	757375,48	9891935,00
MTA_L_30103	20T	30	C	-	-	-	1036	757537,88	9891881,70
MTA_L_30120	25T	38	ABC	1400	1324	1203	1197	757203,36	9892414,28
MTA_L_30722	25T	38	ABC	987	926	847	782	759454,97	9891140,75
MTA_L_30698	25T	38	B	-	-	-	616	761119,57	9889820,34
MTA_L_30212	30T	45	ABC	1457	1390	1253	1263	757207,67	9892729,46

## b. Coordinación Zona 2

Para esta zona se han considerado 35 zonas de protección, las cuales, mediante el procedimiento anterior mencionado, se obtiene la siguiente selección de protecciones a instalar:

**Tabla 16**

*Coordinación de fusibles de la zona 2 del alimentador*

Nombre del nodo	Fusible a instalar	Capacidad nominal fusible (A)	Fase	Icc LLL (A)	Icc LLT (A)	Icc LL (A)	Icc LT (A)	Coord X	Coord Y
MTA_L_130249	25T	38	ABC	1587	1529	1366	1430	756834,70	9894860,00
MTA_L_30301	25T	38	A	-	-	-	1722	756539,61	9893876,17
MTA_L_104334	25T	38	A	-	-	-	1467	757277,02	9894992,85
MTA_L_30228	25T	38	B	-	-	-	1549	756521,66	9893388,78
MTA_L_29494	25T	38	B	-	-	-	1586	756619,29	9894794,43
MTA_L_12739	25T	38	B	-	-	-	1501	757221,26	9894896,27
MTA_L_30219	25T	38	C	-	-	-	1418	756468,06	9893101,00
MTA_L_30219_1	25T	38	C	-	-	-	1448	756561,72	9893181,06
MTA_L_21940	25T	38	C	-	-	-	1147	758019,94	9895962,13
MTA_L_137711	25T	38	C	-	-	-	1146	758035,97	9896022,41
MTA_L_21665	25T	38	C	-	-	-	1258	757723,67	9895605,76
MTA_L_21579	25T	38	C	-	-	-	1248	757786,62	9895570,74
MTA_L_136006	25T	38	C	-	-	-	1426	757360,97	9895079,79
MTA_L_12722_1	25T	38	C	-	-	-	1372	757397,51	9895054,62
MTA_L_12728	25T	38	C	-	-	-	1507	757188,74	9894786,16
MTA_L_12709	25T	38	C	-	-	-	1562	757146,93	9894715,36
MTS_L_9339	30T	45	ABC	1817	1840	1567	1743	756372,59	9894291,54
MTS_L_9375	30T	45	ABC	1817	1839	1567	1743	756373,39	9894287,47
MTS_L_9308	30T	45	ABC	1842	1857	1588	1782	756603,03	9894184,08
MTA_L_12689	30T	45	ABC	1714	1684	1477	1598	757110,47	9894652,80
MTA_L_21442_1	30T	45	A	-	-	-	1720	757291,12	9894123,05
MTA_L_137698	30T	45	A	-	-	-	1648	756940,71	9894464,61
MTA_L_184832	40T	60	ABC	1875	1902	1617	1854	758165,77	9895574,64
MTA_L_12611	40T	60	ABC	1922	1961	1659	1928	758263,89	9895349,30
MTA_L_104001	40T	60	ABC	2082	2180	1801	2213	758688,00	9894913,00
MTA_L_12590	40T	60	A	-	-	-	2021	758174,22	9894764,13
MTA_L_178790	40T	60	A	-	-	-	2037	758359,10	9895126,98

Continúa 

MTA_L_12599	40T	60	B	-	-	-	1943	757936,39	9894681,43
MTA_L_12620	40T	60	C	-	-	-	2000	758310,54	9895222,45
MTA_L_104641	50T	75	ABC	1666	1625	1435	1535	757176,39	9894826,27
MTA_L_29476	50T	75	B	-	-	-	1666	756620,37	9894589,37
MTA_L_12716	50T	75	C	-	-	-	1467	757219,06	9894828,05
MTA_L_29531	80T	120	ABC	1841	1856	1587	1779	756580,61	9894318,69
MTA_L_12677	80T	120	ABC	1839	1849	1585	1779	756996,53	9894402,99
MTA_L_103375	80T	120	ABC	2060	2149	1781	2171	758438,00	9894882,00

### c. Coordinación Zona 3

Finalmente, la zona 3 de coordinación presenta 49 puntos de coordinación que, con el procedimiento de selección de fusibles, se obtienen los siguientes elementos a instalar:

**Tabla 17**

*Coordinación de fusibles de la zona 3 del alimentador*

Nombre del nodo	Fusible a instalar	Capacidad nominal fusible (A)	Fase	Icc LLL (A)	Icc LLT (A)	Icc LL (A)	Icc LT (A)	Coord X	Coord Y
MTA_L_81164	10T	15	A	-	-	-	447	757051,53	9884693,32
MTA_L_107532	10T	15	A	-	-	-	545	757317,30	9887335,71
MTA_L_81091	10T	15	B	-	-	-	486	755709,58	9885814,51
MTA_L_80720	10T	15	C	-	-	-	484	752268,54	9888783,03
MTA_L_30369	12T	18	A	-	-	-	486	748771,41	9893890,97
MTA_L_30324	12T	18	A	-	-	-	535	749656,72	9893258,15
MTA_L_29973	12T	18	A	-	-	-	512	749846,62	9892102,20
MTA_L_29955	12T	18	A	-	-	-	573	750366,38	9892959,29
MTA_L_29948	12T	18	A	-	-	-	610	750606,51	9893602,40
MTA_L_29928	12T	18	A	-	-	-	678	751629,14	9893122,61
MTA_L_29923	12T	18	A	-	-	-	714	752040,64	9892792,21
MTA_L_77960	12T	18	A	-	-	-	624	754556,59	9890378,15
MTA_L_80829	12T	18	B	-	-	-	551	758112,65	9888260,06
MTA_L_80816	12T	18	B	-	-	-	553	758016,55	9888151,56
MTA_L_80851	12T	18	B	-	-	-	676	756696,59	9889312,80
MTA_L_29774	12T	18	C	-	-	-	629	752997,08	9891851,07
MTA_L_80672	12T	18	C	-	-	-	593	754452,41	9888717,04
MTA_L_78034	12T	18	C	-	-	-	734	755868,92	9889683,13
MTA_L_81015	12T	18	C	-	-	-	552	756481,59	9886751,29

Continúa 

MTA_L_81075	15T	23	ABC	693	657	594	529	756459,64	9886266,43
MTA_L_107527	15T	23	ABC	692	656	593	528	756598,61	9886193,62
MTA_L_80928	15T	23	ABC	834	786	715	646	756596,95	9888289,95
MTA_L_29900	15T	23	A	-	-	-	837	753368,05	9892371,52
MTA_L_29886	15T	23	A	-	-	-	850	753476,28	9892315,84
MTA_L_78013	15T	23	A	-	-	-	772	756434,13	9889948,55
MTA_L_107529	15T	23	A	-	-	-	527	756598,60	9886193,61
MTA_L_29873	15T	23	B	-	-	-	905	753924,55	9892470,04
MTA_L_29705	15T	23	B	-	-	-	1035	754834,91	9892880,12
MTA_L_29828	15T	23	C	-	-	-	883	754816,45	9892023,91
MTA_L_80917	15T	23	C	-	-	-	659	756477,79	9888600,22
MTA_L_80950	20T	30	ABC	752	712	645	578	756712,21	9887254,36
MTA_L_77909	20T	30	ABC	1158	1078	994	943	756092,26	9891135,61
MTA_L_77883	20T	30	ABC	1261	1175	1083	1047	755987,06	9891802,12
MTA_L_29959	20T	30	A	-	-	-	558	750152,18	9892923,36
MTA_L_29650	20T	30	A	-	-	-	1021	755581,92	9893643,32
MTA_L_77947	20T	30	A	-	-	-	706	755109,64	9890713,19
MTA_L_77864	20T	30	B	-	-	-	1144	756041,32	9892268,63
MTA_L_29666	20T	30	C	-	-	-	1054	755522,89	9893438,50
MTA_L_77890	20T	30	C	-	-	-	960	755908,46	9891300,26
MTA_L_77839	25T	38	ABC	1449	1384	1245	1255	756111,31	9892780,90
MTA_L_183730_1	25T	38	ABC	1424	1357	1224	1228	756069,77	9892877,54
MTA_L_77831	25T	38	A	-	-	-	1337	756177,90	9893286,08
MTA_L_107521	25T	38	B	-	-	-	722	756417,12	9889199,19
MTA_L_78027	25T	38	C	-	-	-	757	756005,36	9889718,84
MTA_L_77852	25T	38	C	-	-	-	1207	755956,46	9892686,21
MTA_L_77934	30T	45	ABC	1025	959	880	816	755979,27	9890249,93
MTA_L_29913	30T	45	A	-	-	-	830	753293,67	9892356,49
MTA_L_29724	30T	45	C	-	-	-	998	754746,96	9892700,72
MTA_L_77792	50T	75	ABC	1497	1439	1286	1310	756132,46	9893417,61

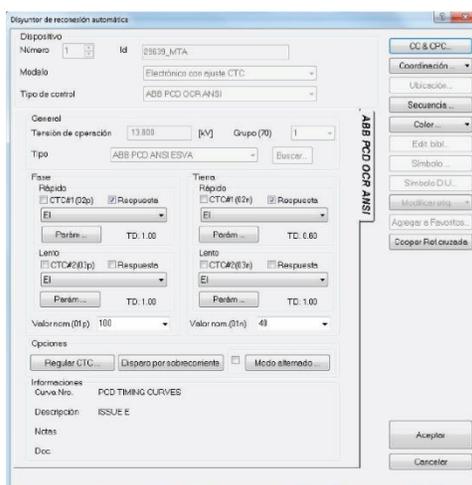
### 5.12.3. Ajustes de reconectores

Para realizar los ajustes de los reconectores de las zonas correspondientes, se considera el criterio de “salvar al fusible”, tomando en cuenta el fusible de menor y mayor capacidad instalados y mediante los criterios de coordinación del capítulo 2.

### a. Reconectador Zona 1

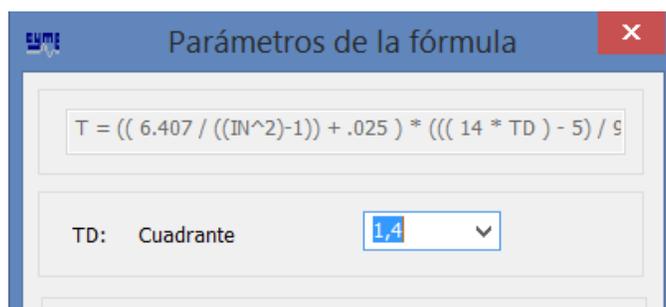
Los fusibles en la zona 1 de mayor y menor capacidad son de 30T y 12T, respectivamente, así que la configuración del reconectador seguirá el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar un reconectador adecuado para cumplir la coordinación fusible – reconectador.
2. Ajustar el tipo de curva del reconectador (en este caso, extremadamente inversa EI), y el umbral de disparo.



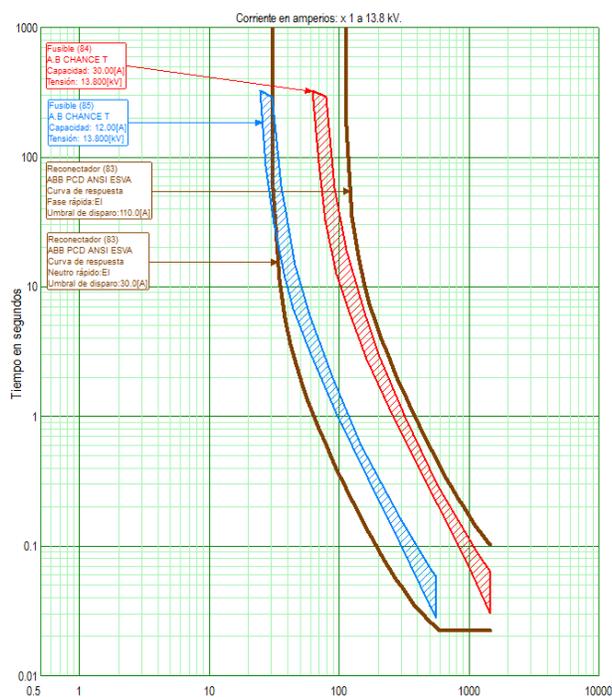
**Figura 37.** Ajuste de curvas de respuesta y umbral de disparo del reconectador

3. Determinar el cuadrante correspondiente a la coordinación de cada curva con su respectivo criterio del fusible.



**Figura 38.** Selección del cuadrante de operación de la curva de fase rápida del reconectador

4. Ajustar las curvas del reconectador hasta obtener una coordinación eficiente y que cumpla los criterios citados en el capítulo 2.



**Figura 39.** Coordinación reconectador - fusibles de la zona 1 del alimentador Alpamalag - La Merced – Isinche

5. Por tanto, para este caso, el ajuste del reconectador resulta de la siguiente manera:

**Tabla 18***Ajustes del reconectador zona 1*

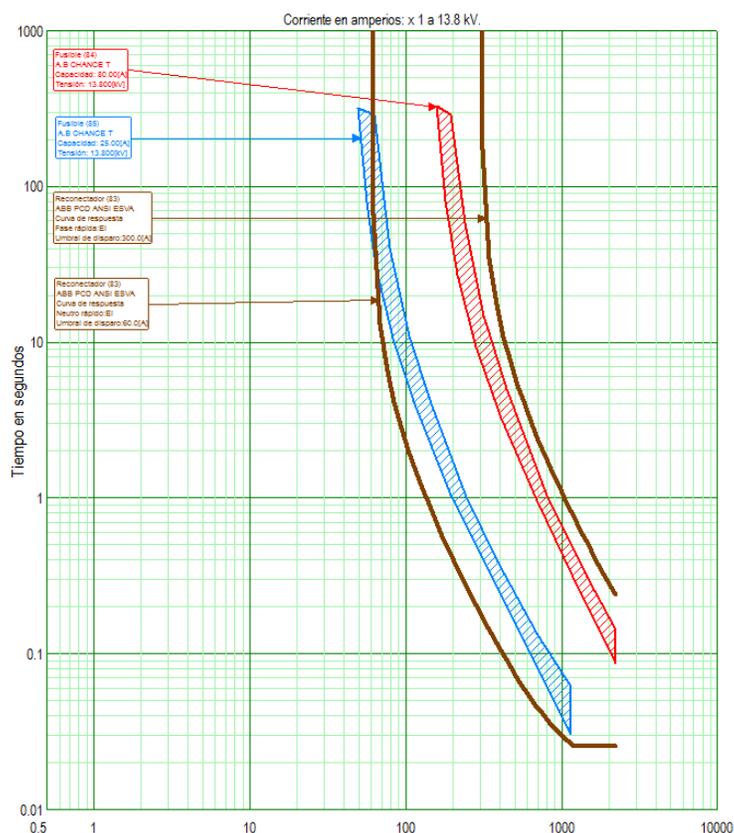
RECONECTADOR ZONA 1		
<b>FASE</b>	Pick up I>	110 A
	Cuadrante	1,4 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa
<b>TIERRA</b>	Pick up I>	30 A
	Cuadrante	0,7 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa

**b. Reconectador Zona 2**

Para la selección del reconectador de esta zona, se siguen los mismos pasos que para el reconectador de la zona 1. En este caso los fusibles de mayor y menor capacidad son de 80T y 25T respectivamente, obteniendo así, los siguientes resultados:

**Tabla 19***Ajustes del reconectador zona 2*

RECONECTADOR ZONA 2		
<b>FASE</b>	Pick up I>	300 A
	Cuadrante	1,4 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa
<b>TIERRA</b>	Pick up I>	80 A
	Cuadrante	0,55 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa



**Figura 40.** Coordinación reconectador - fusibles de la zona 2 del alimentador Alpalmag  
- La Merced – Isinche

### c. Reconectador Zona 3

Finalmente, para el reconectador de la última zona de coordinación del alimentador Alpalmag – La Merced – Isinche, se toma en cuenta los fusibles 10T y 50T, con los cuales se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 20

## Ajustes del reconectador zona 3

RECONECTADOR ZONA 3		
FASE	Pick up I>	180 A
	Cuadrante	1,3 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa
TIERRA	Pick up I>	25 A
	Cuadrante	0,55 s
	Tipo de curva	IEEE Extremadamente Inversa

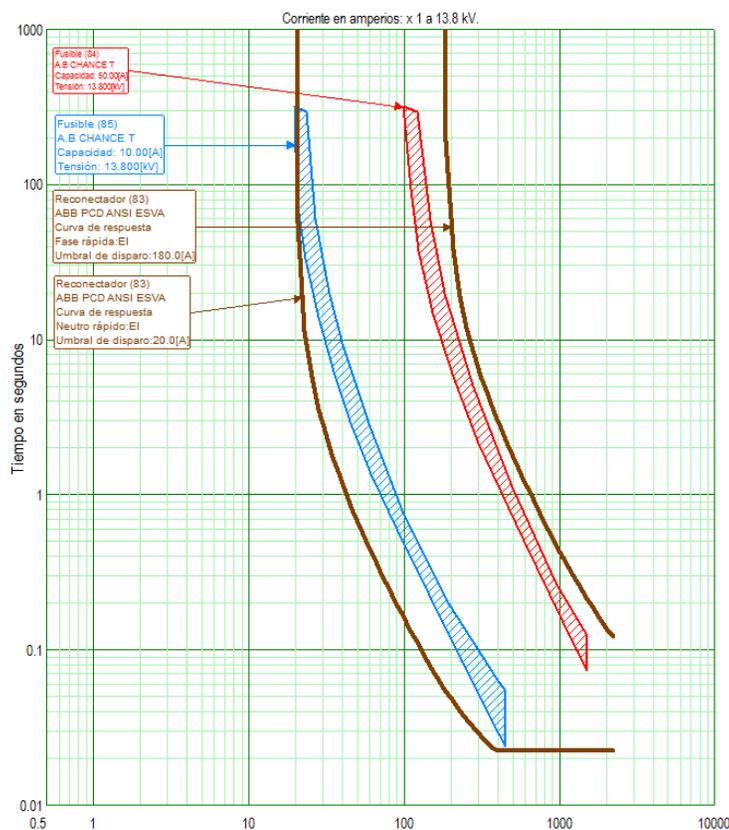


Figura 41. Coordinación reconectador - fusibles de la zona 3 del alimentador Alpamagal

- La Merced – Isinche

#### 5.12.4. Ajuste de relés

Los alimentadores de la primera barra de la subestación utilizan un relé de sobrecorriente General Electric F-650, y en la distribución de la segunda barra, se han optado por relés Schweitzer SEL 451.

La configuración sigue una serie de pasos que se mencionan a continuación, tanto para calibrar el relé de fase, como el de neutro.

##### a. Configuración del relé Schweitzer SEL 451

El alimentador contará con el relé electrónico que actuará para sobrecorrientes tanto de fase como de neutro, en intervalos de tiempo instantáneo y temporizado, cuya alimentación será mediante un transformador de corriente con relación 300/5.

##### **Fase**

Para la configuración de la protección de fase del relé, se toma en cuenta al fusible de mayor capacidad del alimentador, que en este caso es de 80T, que se encuentra ubicado cerca a la S/E y la relación de transformación (RTC) del transformador de corriente.

##### **Temporizado**

Para calcular el TAP de relé, se lo hace mediante la siguiente fórmula:

$$TAP = \frac{I_{arranque\ deseada}}{RTC} \quad (1)$$

Donde:

$$I_{\text{arranque deseada}} = k * I_{\text{carga}} \quad (2)$$

La corriente de carga, se toma de la corriente nominal en estado continuo del fusible, y el factor “k” va de  $1,0 < k \leq 2,0$ . Donde un valor típico de k es 1,5. (Zapata & Mejía, 2003).

Por lo tanto, para calcular el TAP del relé SEL 451 se procede:

- RTC = 60
- I carga = (80T) 120 A
- k = 1,5

$$TAP = \frac{1,5 * 120}{60} = 3$$

Se escoge, entonces, el TAP 3.

Para la configuración del DIAL, se realiza con los tiempos de coordinación entre la curva lenta del reconectador como elemento primario, y al relé como dispositivo secundario, acorde con lo previsto en el capítulo 2 (intervalo de coordinación entre 0,2 y 0,3 segundos).

**Figura 42.** Configuración del relé 51 (temporizado) del alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche

### Instantáneo

Para la configuración del instantáneo se utiliza la misma fórmula para la selección del TAP, sin embargo, la corriente de carga será la corriente de falla máxima del sistema, no se considera el factor de seguridad, ya que la protección debe actuar rápidamente ante las fallas de magnitud elevada y su DIAL tendrá un margen preestablecido de 0,02 s.

- $RTC = 60$
- $I_{carga} = 2213 \text{ A}$

$$TAP = \frac{2213}{60} = 36,88$$

Se escoge, por selección del inmediato superior, el TAP 37.

Instantáneo

Modo instantáneo

Relación TC x Toma I

Rel. TC x Tomal x TomaL

Intensidad primaria

Aceptar

Cancelar

Disparo instantáneo

Dominio de las tomas: 1.0 / 40.0 (INST)

Toma I (instantánea): 37.00

Relación TC

P: 300.00 : S: 5.00

Instantáneo: 2220.0 A

Retardo: 0.01 [s]

Mostrar curva original + instantáneo

**Figura 43.** Configuración del relé 50 (instantáneo) del alimentador Alpamalag - La Merced - Isinche

## Tierra

Muchos fabricantes disponen que las curvas del relé de tierra, sean idénticas a las de fase, en cambio otros, manifiestan que, como la corriente de tierra es menor que la de fase en condiciones normales de operación, las curvas del relé de tierra sean menores en tiempo (mas no en corriente) que las curvas de fase.

Mediante este criterio se ajusta al relé de tierra idénticamente al relé de fase y, se iterará los DIAL de los relés temporizados de cada uno para satisfacer los criterios de coordinación entre fusibles, reconectores y relés.

Por lo tanto, el relé 50/51 y 50/51N para el alimentador Alpamalag – La Merced – Isinche se ajusta de la siguiente manera:

**Tabla 21**

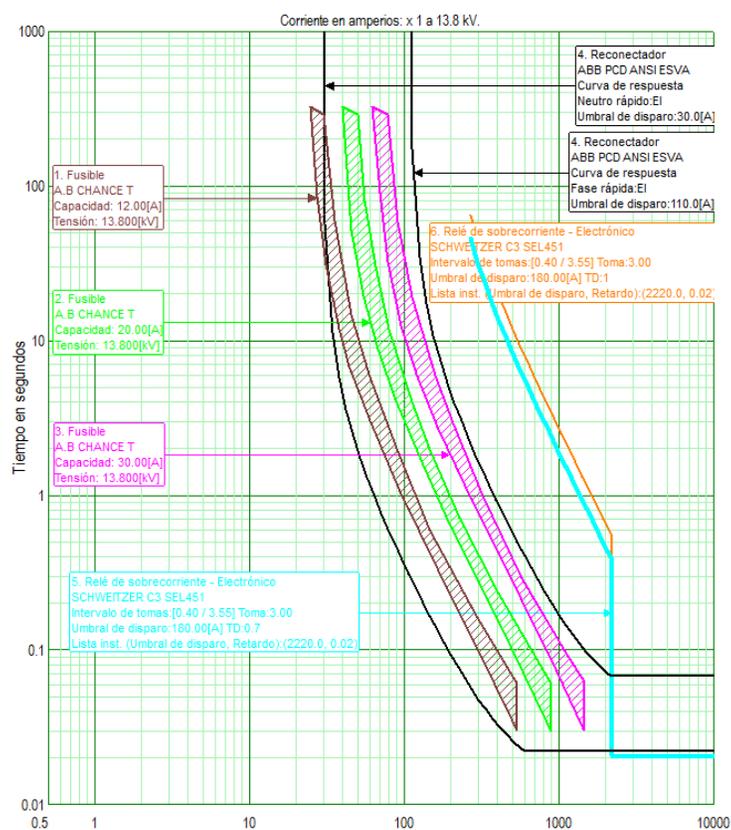
*Configuración del relé 50/51 y 50/51N del alimentador*

SCHWEITZER C3 SEL 451		
<b>FASE</b>	Pick up I>	3 A
	Dial Time	1 s
	Tipo de Curva	IEC Extremadamente Inversa
	Pick up I>>	37 A
	Delay Time	0,02 s
<b>TIERRA</b>	Pick up I>	3 A
	Dial Time	0,7 s
	Tipo de Curva	IEC Extremadamente Inversa
	Pick up I>>	37 A
	Delay Time	0,02 s

### 5.13. Secuencias de operación por zonas

La secuencia de operación es el orden en el que actúan los elementos ante la presencia de una falla. Por tanto, se muestran los resultados obtenidos mediante la coordinación por zona.

### 5.13.1. Zona 1



**Figura 44.** Coordinación conjunta zona 1 del alimentador

Margen del dispositivo

Modo

1-FUSE A.B CHANCE T CC Máx

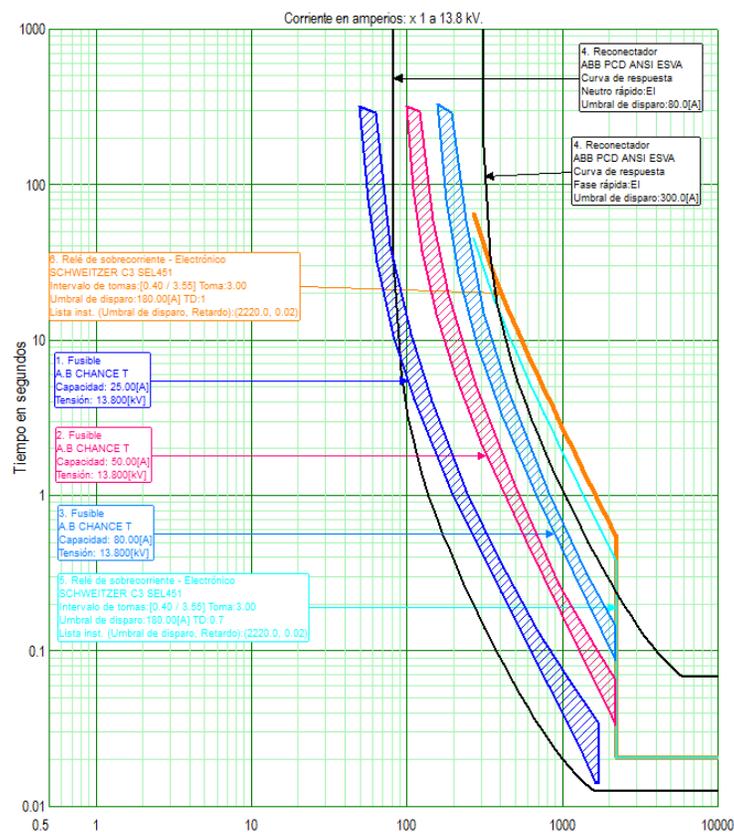
Corriente: 534.0000 [A]

Dispositivo	Curva	Segundos	Delta
Reconector - ABB PCD ANSI ESVA (4)	Tierra Rápido...	0,0242	—
Fusible - A.B CHANCE T (1)	Mín	0,0297	0,0055
Fusible - A.B CHANCE T (1)	Máx	0,0609	0,0312
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Mín	0,0862	0,0253
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Máx	0,1435	0,0573
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Mín	0,2353	0,0918
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Máx	0,3365	0,1012
Reconector - ABB PCD ANSI ESVA (4)	Fase Rápido ...	0,5012	0,1647
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	7,1841	6,6829
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	10,2630	3,0789

Mode: Cortocircuito S.O.O.

**Figura 45.** Secuencia de operación de protecciones de la zona 1 del alimentador

### 5.13.2. Zona 2



**Figura 46.** Coordinación conjunta zona 2 del alimentador

Margen del dispositivo

Modo

3-FUSE A.B CHANCE T CC Máx

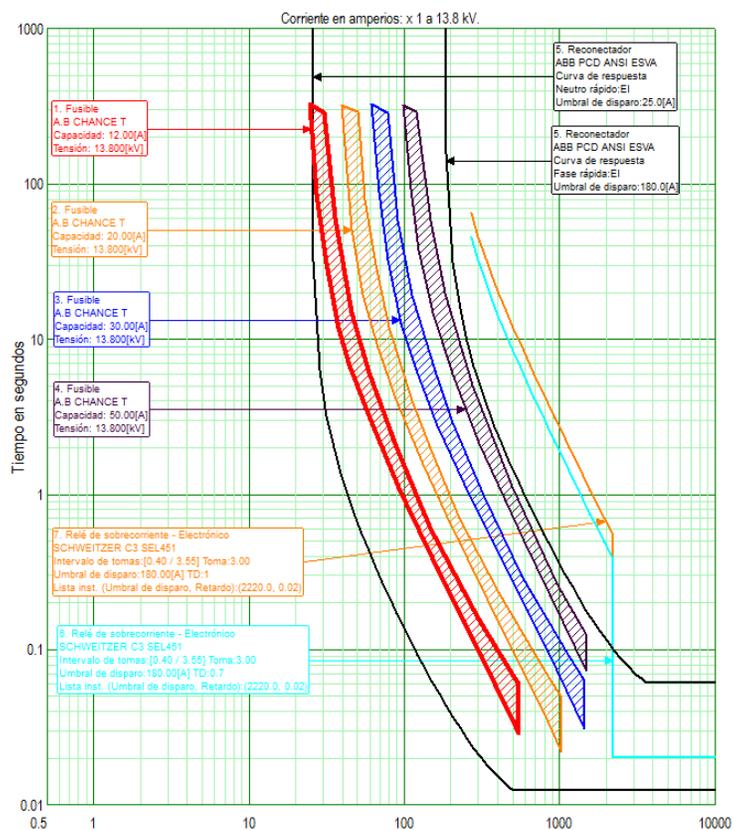
Corriente: 2213.0000 [A]

Dispositivo	Curva	Segundos	Delta
Reconectador - ABB PCD ANSI ESVA (4)	Tierra Rápido...	0.0123	—
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Mín	0.0328	0.0205
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Máx	0.0637	0.0309
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Mín	0.0858	0.0221
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Máx	0.1416	0.0558
Reconectador - ABB PCD ANSI ESVA (4)	Fase Rápido ...	0.2352	0.0936
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	0.3730	0.1378
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	0.5328	0.1598

Mode: Cortocircuito S.O.O.

**Figura 47.** Secuencia de operación de protecciones de la zona 2 del alimentador

### 5.13.3. Zona 3



**Figura 48.** Coordinación conjunta zona 3 del alimentador

Margen del dispositivo

Modo

1-FUSE A.B CHANCE T CC Máx

Corriente: 545,0000 [A]

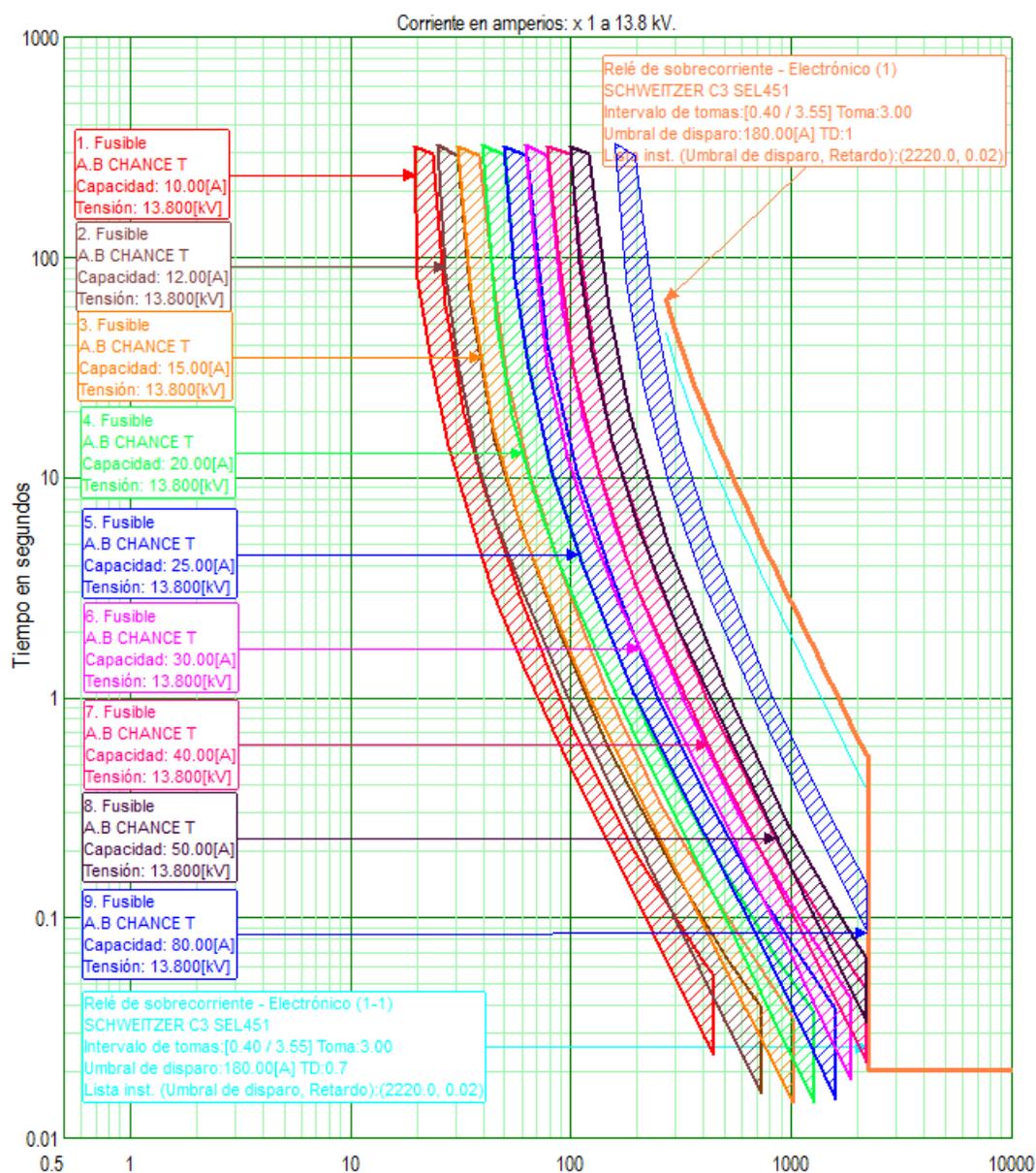
Dispositivo	Curva	Segundos	Delta
Reconector - ABB PCD ANSI ESVA (5)	Tierra Rápido...	0.0123	—
Fusible - A.B CHANCE T (1)	Mín	0.0285	0.0162
Fusible - A.B CHANCE T (1)	Máx	0.0591	0.0306
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Mín	0.0826	0.0235
Fusible - A.B CHANCE T (2)	Máx	0.1387	0.0561
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Mín	0.2258	0.0871
Fusible - A.B CHANCE T (3)	Máx	0.3224	0.0966
Fusible - A.B CHANCE T (4)	Mín	0.5904	0.2680
Fusible - A.B CHANCE T (4)	Máx	0.9037	0.3133
Reconector - ABB PCD ANSI ESVA (5)	Fase Rápido ...	1.1882	0.2845
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	6.8605	5.6723
Relé de sobrecorriente - SCHWEITZER C3 SE...	TCC	9.8007	2.9402

Mode: Cortocircuito S.O.O.

**Figura 49.** Secuencia de operación de protecciones de la zona 3 del alimentador

## 5.14. Resultados y ajustes de la coordinación conjunta

La coordinación conjunta del alimentador 10PJ13B2S1 Alpalagal – La Merced – Isinche se muestra a continuación:



**Figura 50.** Coordinación conjunta alimentador Alpalagal - La Merced - Isinche

## CONCLUSIONES

- Mediante el esquema modelado del nuevo alimentador, se alivió la carga de los alimentadores actuales de la S/E Pujilí, en un 48,42% de capacidad instalada actualmente.
- Se determinaron los ajustes de las nuevas protecciones eléctricas a instalar acorde con los criterios de coordinación entre elementos, obteniendo así un sistema fiable y seguro para el alimentador Alpamalag – La Merced – Isinche.
- Se ubicaron puntos geográficos con coordenadas reales para el diseño del alimentador y de sus ramales principal y secundarios, asegurando así las magnitudes precisas de distancia entre los conductores y elementos del sistema.
- Se realizó un modelo detallado del alimentador de estudio en el software CYMDIST, con una actualización del modelo al año en curso, para evitar el riesgo de obtener magnitudes de corrientes de cortocircuitos incorrectos.
- El análisis eléctrico realizado al alimentador se basó únicamente en obtener las magnitudes de las corrientes de cortocircuito, debido a la configuración radial del sistema, la carga exclusivamente residencial, la fuente es única y el flujo de potencia es unidireccional.
- Se analizaron las magnitudes máximas de cortocircuito en cada punto del sistema, resultando así que las zonas más alejadas de la subestación poseen una cantidad relativamente baja de corriente de falla, en comparación con los puntos más cercanos, en un orden de casi 5 veces mayor.

- Se realizó la coordinación de las protecciones, acorde a los criterios establecidos en este proyecto, se omitió en su mayoría, los dispositivos en el ramal principal para asegurar que las protecciones actúen independientemente en los ramales secundarios, asegurando así la disponibilidad del suministro de energía eléctrica en áreas aledañas a la falla.

## **RECOMENDACIONES**

- A los diseñadores de los modelos de sistemas eléctricos, mantener actualizado al sistema, ya que es de suma importancia al momento de realizar análisis, debido a que la más mínima omisión de un elemento, cambia radicalmente los resultados y el estudio no sería preciso.
- Un balance de carga planificado en el tiempo, resulta eficaz para evitar el sobrecalentamiento de las líneas, obteniendo más disponibilidad de la energía eléctrica y asegurando más el tiempo de vida de las protecciones.
- Cuando suceda una falla y el equipo fusible haya operado, es recomendable reemplazarlo con uno de las mismas características ya que, de lo contrario, se perdería toda coordinación y, ante la presencia de una nueva falla, la secuencia de operación puede alterarse y se tendrían daños a los equipos protectores aledaños.
- Realizar un enfoque técnico del alimentador en cuestión, realizar los cambios necesarios acorde a la propuesta de solución detallada en el proyecto en mención.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chanatasig, L. E. (2016). *Coordinación de Protecciones de los Alimentadores Primarios a 13,8 kV de la S/E Pujilí para la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi. Tesis de Ingeniería*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- COOPER Power Systems. (2008). Reconectores de Vacío del tipo KFE Electrónicamente Controlados. 12.
- EATON Powering Business Worldwide. (2018). *Análisis de sistemas de distribución CYMDIST*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2018, de <http://www.cyme.com/es/software/cymdist/>
- EATON, Powering Business Worldwide. (2014). Cartuchos fusibles de media tensión. 7.
- EATON, Powering Business Worldwide. (2018). *Coordinación de los dispositivos de protección*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2018, de <http://www.cyme.com/es/software/cymtcc/>
- Gers, J. M., & Holmes, E. J. (2004). *Protection of Electricity Distribution Networks*. Londres: MPG Books Ltd.
- Katyara, S., Staszewski, L., & Leonowicz, Z. (2018). Protection Coordination of Properly Sized and Placed Distributed Generations-Methods, Applications and Future Scope. *Energies* 2018, 1-2.

- Lara, J. (2014). *Diseño e implementación de una hoja de cálculo para efectuar la coordinación de protecciones eléctricas en medio voltaje. Tesis de Ingeniería.* Latacunga.
- Loma, J., & Toapanta, G. (2018). *Análisis actual de las protecciones del sistema de subtransmisión a 69 kV de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi ELEPCO S.A., con el ingreso de potencia de la central Coca Codo Sinclair y otras instalaciones. Tesis de Ingeniería.* Latacunga.
- Mejía, J., & Ollague, H. (2012). *Estudio para la coordinación de protecciones mediante selectividad lógica para los centros de fuerza de la central Molino, presa Daniel Palacios y central Mazar de la Empresa CELEC Hidropaute. Tesis de Ingeniería.* Cuenca.
- NOJA Power. (2017). OSM 15 OSM 27 Reconectador automático de 15 & 27 kV. 1.
- Ramírez Alanis, M. S. (2005). *Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia.* Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ramírez Castaño, S. (2009). *Redes de Distribución de Energía.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Regalado, W. (2003). *Coordinación de Protecciones Eléctricas de los Alimentadores Primarios del Sistema Eléctrico Tena. Tesis de Ingeniería.* Latacunga.
- Schweitzer Engineering Laboratories. (2017). SEL-751 Relé de protección de alimentador. 1.

Soto, C. E. (2005). *Estudio de coordinación y ajuste de protecciones en tres circuitos de la S/E Turén en 13,8 kV. Informe final de Pasantías*. Sartenejas.

Tuta, Ó., & Hincapié, R. (2011). Coordinación óptima de dispositivos de protección en sistemas de distribución con presencia de generación distribuida. *Scientia et Technica*, 1.

Westinghouse Electric Corporation. (1965). *Electric utility engineering reference book. Vol. 3. Distribution systems*. East Pittsburgh: The Corporation.

Zapata, C., & Mejía, G. (2003). Coordinación de relés de sobrecorriente en sistemas radiales utilizando programación lineal. *SCIENTIA ET TECHNICA*, 3.

**ANEXOS**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo de Investigación fue desarrollado por el señor  
ANTONY ALEXANDER ANDRADE MANTILLA.

En la ciudad de Latacunga, a los 25 días del mes de enero del 2019.

Aprobado por:

ING. IBETH DELGADO

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

ING. KATYA TORRES VÁSQUEZ

**DIRECTORA DE CARRERA**



**SECRETARIO ACADÉMICO**

