

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA  
Y MECÁNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**T E S I S**

**COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN DE LA LÍNEA L-3303 EN 33KV  
PAUCARTAMBO-SALVACIÓN, CON LA INSERCIÓN DE LA SUBESTACIÓN  
PILLCOPATA 2024**

**PRESENTADO POR:**

BR. ORLANDO HUAMANI ATANACIO

BR. ROY ROGER CCOPA QUESSO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**ASESOR:**

M.SC. WILBERT JULIO LOAIZA CUBA

**CUSCO – PERU**

**2025**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN DE LA LÍNEA L-3303 EN 33 KV PAUCARTAMBO - SALVACIÓN, CON LA INSERCIÓN DE LA SUBESTACIÓN PILLCO PATA 2024.

Presentado por: ORLANDO HUAMANÍ ATANCIO DNI N° 42318274  
presentado por: ROY ROGER CCOPA BUESSO DNI N°: 45148368  
Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje     | Evaluación y Acciones                                                                                                                                                                                                                                                         | Marque con una (X) |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Del 1 al 10%   | No se considera plagio.                                                                                                                                                                                                                                                       | <u>X</u>           |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las correcciones.                                                                                                                                                                                                                                    |                    |
| Mayor a 31%    | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. |                    |

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 11 de JULIO de 2025



Firma

Post firma WILBERT JULIO LOAIZA CUSA

Nro. de DNI 23829491

ORCID del Asesor 0000 - 0003 - 3901 - 3178

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259 : 472787274

# 8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## ***Dedicatoria***

*A mi familia, pilar fundamental en cada paso de este camino.*

*A mis padres, a mi abuela por enseñarme el valor del esfuerzo  
y la perseverancia, y por su constante apoyo incondicional.  
Sus enseñanzas han sido la guía que me ha permitido llegar  
hasta aquí.*

*A mi pareja, por su paciencia, comprensión y amor  
inquebrantable durante este largo proceso. Sin su respaldo y  
aliento, esto no habría sido posible.*

*Y a mis hijos, cuya alegría e inocencia me han recordado  
diariamente la importancia de seguir adelante. Son mi mayor  
inspiración y el motivo de mi esfuerzo.*

*Este logro es también de ustedes.*

*Br. Orlando Huamaní Atanacio*

*Br. Roy Roger Ccopa*

*Quesso*

## ***Agradecimientos***

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento y dedicación han sido fundamentales para el logro de este proyecto.*

*Agradezco también a los docentes de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, quienes a lo largo de mi formación profesional han compartido su experiencia y sabiduría, motivándome a seguir creciendo en el campo de la ingeniería eléctrica. Sus enseñanzas han sido una inspiración y una guía a lo largo de mi carrera.*

*A todos, mi más profundo agradecimiento por contribuir a mi desarrollo académico y profesional.*

*Br. Orlando Huamaní Atanacio*

*Br. Roy Roger Ccopa Quesso*

## ÍNDICE GENERAL

---

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| ÍNDICE GENERAL .....                              | IV        |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                            | VII       |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                           | VIII      |
| TERMINOLOGÍA .....                                | X         |
| RESUMEN .....                                     | XI        |
| <b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....</b>             | <b>12</b> |
| 1.1. INTRODUCCIÓN .....                           | 12        |
| 1.2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN .....         | 12        |
| 1.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....                   | 13        |
| 1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....             | 15        |
| 1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....                | 16        |
| 1.5.1. PROBLEMA GENERAL .....                     | 16        |
| 1.5.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....                 | 16        |
| 1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....          | 17        |
| 1.6.1. OBJETIVO GENERAL.....                      | 17        |
| 1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                 | 17        |
| 1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO..... | 17        |
| 1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....     | 17        |
| 1.8.1. ALCANCES .....                             | 17        |
| 1.8.2. LIMITACIONES .....                         | 18        |
| 1.9. HIPÓTESIS .....                              | 18        |
| 1.9.1. HIPÓTESIS GENERAL.....                     | 18        |
| 1.9.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....                 | 18        |
| 1.10. VARIABLES E INDICADORES.....                | 19        |
| 1.11. POBLACIÓN Y MUESTRA.....                    | 19        |
| 1.12. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....             | 20        |
| 1.13. METODOLOGÍA.....                            | 20        |
| 1.13.1. CARACTERÍSTICAS DE LA INVESTIGACIÓN.....  | 20        |
| 1.13.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....    | 20        |
| 1.13.3. PROCESAMIENTO DE DATOS .....              | 21        |
| <b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>            | <b>22</b> |
| 2.1. INTRODUCCIÓN .....                           | 22        |

|                                                                   |                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.                                                              | ANTECEDENTES .....                                                      | 22        |
| 2.3.                                                              | ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO EN SISTEMAS ELECTRICOS                  | 24        |
| 2.3.1.                                                            | ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA.....                                         | 24        |
| 2.3.2.                                                            | ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO.....                                          | 26        |
| 2.3.2.1.                                                          | Clasificación de fallas en sistemas eléctricos.....                     | 27        |
| 2.3.2.2.                                                          | Falla monofásica (1 $\phi$ ). Fase – tierra.....                        | 28        |
| 2.3.2.3.                                                          | Falla bifásica (2 $\phi$ ). Fase – fase.....                            | 29        |
| 2.3.2.4.                                                          | Falla bifásica a tierra. Dos fases – tierra .....                       | 30        |
| 2.3.2.5.                                                          | Falla trifásica (3 $\phi$ ).....                                        | 30        |
| 2.3.2.6.                                                          | Ocurrencia de tipos de falla .....                                      | 31        |
| 2.3.2.7.                                                          | Ocurrencia de fallas en el sector del sistema eléctrico .....           | 32        |
| 2.3.3.                                                            | ANÁLISIS CON SOFTWARE POWERFACTORY DIGSILENT .....                      | 32        |
| 2.3.3.1.                                                          | Flujo de carga con Power Factory DIGSILENT .....                        | 33        |
| 2.3.3.2.                                                          | Cortocircuito con Power Factory DIGSILENT .....                         | 34        |
| 2.4.                                                              | SISTEMAS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA .....                                  | 36        |
| 2.4.1.                                                            | SISTEMA DE PROTECCIÓN .....                                             | 36        |
| 2.4.2.                                                            | OBJETIVOS DEL SISTEMA PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....                      | 37        |
| 2.4.3.                                                            | AJUSTES DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS .....                            | 37        |
| 2.4.4.                                                            | COORDINACIÓN DE PROTECCION .....                                        | 38        |
| 2.5.                                                              | AJUSTE Y LA COORDINACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE LAS<br>SUBESTACIONES. .... | 38        |
| 2.5.1.                                                            | PRINCIPIOS GENERALES: COORDINACIÓN DE LA PROTECCIÓN .....               | 39        |
| 2.5.1.1.                                                          | Sensibilidad y velocidad (COES SINAC, 2018).....                        | 39        |
| 2.5.1.2.                                                          | Selectividad de la protección (COES SINAC, 2018).....                   | 40        |
| 2.5.1.3.                                                          | Fiabilidad y seguridad de la protección.....                            | 40        |
| 2.5.2.                                                            | Proceso de ajuste y coordinación de la protección.....                  | 40        |
| 2.5.3.                                                            | CRITERIOS DE AJUSTES PARA SUBESTACIONES PEQUEÑAS.....                   | 41        |
| 2.5.4.                                                            | CRITERIOS DE COORDINACION DE PROTECCIONES .....                         | 42        |
| 2.5.4.1.                                                          | Para fallas en bornes de AT del transformador .....                     | 42        |
| 2.5.4.2.                                                          | Para fallas en bornes de BT del transformador .....                     | 42        |
| 2.5.4.3.                                                          | Para fallas en barras de BT de la subestación .....                     | 42        |
| 2.5.4.4.                                                          | Para fallas en las líneas de salida de BT.....                          | 42        |
| 2.5.5.                                                            | PROCEDIMIENTOS PARA DEFINIR LOS AJUSTES DE PROTECCIÓN .....             | 43        |
| 2.5.5.1.                                                          | Recopilación de Datos .....                                             | 43        |
| 2.5.5.2.                                                          | Modelamiento de la Red Eléctrica .....                                  | 43        |
| 2.5.5.3.                                                          | Creación de Base de Datos de Ajustes de Equipos de Protección.....      | 43        |
| 2.5.5.4.                                                          | Análisis de Flujo de Carga .....                                        | 43        |
| 2.5.5.5.                                                          | Análisis de Cortocircuitos .....                                        | 43        |
| 2.5.5.6.                                                          | Cálculos de Ajustes de los Sistemas de Protección.....                  | 44        |
| 2.5.5.7.                                                          | Evaluación y Validación de los Ajustes Propuestos .....                 | 44        |
| 2.6.                                                              | SIMULACIÓN DE FALLAS .....                                              | 44        |
| 2.6.1.                                                            | ESCENARIOS PARA SIMULACIÓN DE FALLAS .....                              | 44        |
| 2.6.1.1.                                                          | Máxima corriente de falla .....                                         | 44        |
| 2.6.1.2.                                                          | Mínima corriente de falla .....                                         | 44        |
| 2.6.2.                                                            | SIMULACIÓN DE FALLAS EN SUBESTACIONES.....                              | 44        |
| 2.6.3.                                                            | SIMULACIÓN DE FALLAS EN LINEAS.....                                     | 45        |
| <b>CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ACTUAL ..</b> |                                                                         | <b>46</b> |
| 3.1.                                                              | INTRODUCCIÓN .....                                                      | 46        |
| 3.2.                                                              | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL .....                          | 46        |

|                        |                                                                                    |           |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.                   | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO.....                                  | 50        |
| 3.3.1.                 | SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PAUCARTAMBO.....                                             | 50        |
| 3.3.2.                 | SUBESTACIÓN ELÉCTRICA SALVACIÓN .....                                              | 51        |
| 3.3.3.                 | SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PILLCOPATA.....                                              | 52        |
| 3.3.4.                 | LINEA L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación.....                                | 54        |
| 3.4.                   | ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO .....                                               | 56        |
| 3.4.1.                 | SIMULACIONES DE FLUJO DE CARGA .....                                               | 56        |
| 3.4.2.                 | RESULTADOS DE FLUJO DE CARGA - RED PROYECTADO .....                                | 58        |
| 3.4.3.                 | SIMULACIONES DE CORTO CIRCUITO – RED PROYECTADO.....                               | 58        |
| 3.5.                   | SISTEMA DE PROTECCIÓN ACTUAL .....                                                 | 58        |
| 3.5.1.                 | PROTECCIÓN EN LA S.E. PISAC.....                                                   | 60        |
| 3.5.1.1.               | Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente de fases .....             | 60        |
| 3.5.1.2.               | Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente fase a tierra.....         | 61        |
| 3.5.2.                 | PROTECCIÓN EN LA S.E. PAUCARTAMBO.....                                             | 61        |
| 3.5.2.1.               | Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente de fases ..          | 61        |
| 3.5.2.2.               | Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente fase a tierra        | 63        |
| 3.5.3.                 | PROTECCIÓN EN LA S.E. SALVACIÓN .....                                              | 64        |
| 3.5.3.1.               | Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente de fases .....         | 64        |
| 3.5.3.2.               | Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente fase a tierra .        | 65        |
| 3.5.3.3.               | Normas De Coordinación de Protección .....                                         | 66        |
| <b>CAPÍTULO 4.</b>     | <b>AJUSTES DE PROTECCIÓN PROPUESTO.....</b>                                        | <b>68</b> |
| 4.1.                   | INTRODUCCIÓN .....                                                                 | 68        |
| 4.2.                   | IMPACTO DE LA INSERCIÓN DE LA S.E. PILLCOPATA .....                                | 68        |
| 4.2.1.                 | Impacto en los Niveles de Corriente de Cortocircuito .....                         | 68        |
| 4.2.2.                 | Modificación de la Topología y Operación de la Línea.....                          | 69        |
| 4.2.3.                 | Consideraciones de Coordinación de las Protecciones en una Línea Radial .....      | 69        |
| 4.2.4.                 | Revisión de las Curvas de Tiempo Inverso y Definido.....                           | 69        |
| 4.3.                   | PROPUESTA DE NUEVOS AJUSTES DE PROTECCIÓN.....                                     | 69        |
| 4.3.1.                 | Ubicación de las protecciones en la S.E. Paucartambo, Salvación y Pillcopata ..... | 70        |
| 4.3.2.                 | S.E. Pillcopata - Protección 50/51 Propuesto.....                                  | 72        |
| 4.3.2.1.               | Ajustes Propuestos S.E. Pillcopata – Protección sobrecorriente 50/51 .....         | 74        |
| 4.3.3.                 | S.E. Pillcopata - Protección 50N/51N Propuesto .....                               | 78        |
| 4.3.3.1.               | Ajustes Propuestos S.E. Pillcopata – Protección sobrecorriente 50N/51N             | 79        |
| 4.3.4.                 | S.E. Salvación - Protección 50/51 y 50N/51N Propuesto .....                        | 82        |
| <b>CONCLUSIONES</b>    | <b>.....</b>                                                                       | <b>83</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b> | <b>.....</b>                                                                       | <b>84</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>    | <b>.....</b>                                                                       | <b>85</b> |
| <b>ANEXOS</b>          | <b>.....</b>                                                                       | <b>87</b> |



## ÍNDICE DE TABLAS

---

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1. Variables e Indicadores Independientes .....                                                                                         | 19 |
| Tabla 1.2. Variables e Indicadores Dependientes.....                                                                                            | 19 |
| Tabla 2.1. Tasa de fallas de acuerdo con el tipo (1 $\phi$ , 2 $\phi$ ó 3 $\phi$ ).....                                                         | 32 |
| Tabla 2.2. Taza de ocurrencia de falla en un sistema eléctrico .....                                                                            | 32 |
| Tabla 2.3. Protecciones graduadas en subestaciones pequeñas.....                                                                                | 41 |
| Tabla 2.4. Ajuste de protecciones graduadas en subestaciones pequeñas.....                                                                      | 41 |
| Tabla 3.1. Características técnicas de la S.E. Salvación.....                                                                                   | 51 |
| Tabla 3.2. Localidades suministradas por la S.E. Salvación .....                                                                                | 51 |
| Tabla 3.3. Características técnicas de la S.E. Pillcopata .....                                                                                 | 52 |
| Tabla 3.4. Características técnicas de la línea de 33 kV, Paucartambo - Pillcopata .....                                                        | 55 |
| Tabla 3.5. Características técnicas de la línea en 33 kV, Pillcopata - Salvación .....                                                          | 55 |
| Tabla 3.6. Resultados de flujo de carga Proyectado. Máxima y Mínima Demanda .....                                                               | 58 |
| Tabla 3.7. Cargabilidad de transformadores de potencia en Máxima Demanda.....                                                                   | 58 |
| Tabla 3.8. Resultado de corto circuito en Máxima y Mínima Demanda.....                                                                          | 58 |
| Tabla 3.9. Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente de fases .....                                                               | 60 |
| Tabla 3.10. Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente de fase tierra .....                                                        | 61 |
| Tabla 3.11. Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente fases.....                                                            | 61 |
| Tabla 3.12. Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente fase a tierra ..                                                      | 63 |
| Tabla 3.13. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente de fases .....                                                          | 64 |
| Tabla 3.14. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente fase a tierra .....                                                     | 65 |
| Tabla 4.1. Determinación de ajustes de protección de la protección 50/51 en el área de influencia: S.E. Pisac, Paucartambo y Pillcopata .....   | 74 |
| Tabla 4.2. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de fases entre la S.E. Pillcopata, Paucartambo y Pisac .....                        | 74 |
| Tabla 4.3. Determinación de ajustes de protección de la protección 50N/51N en el área de influencia: S.E. Pisac, Paucartambo y Pillcopata ..... | 78 |
| Tabla 4.4. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de tierra entre la S.E. Pillcopata, Paucartambo y Pisac .....                       | 79 |
| Tabla 4.5. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de fases S.E. Salvación.....                                                        | 82 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.6. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de tierra S.E. Salvación ..... | 82 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Ámbito de estudio y aplicación: Sistema Eléctrico Actual y Proyectado .....                                                    | 14 |
| Figura 1.2. Ubicación geográfica de la provincia de Paucartambo .....                                                                      | 15 |
| Figura 2.1. Diagrama del circuito del punto de falla .....                                                                                 | 28 |
| Figura 2.2. Diagrama de falla monofásica.....                                                                                              | 29 |
| Figura 2.3. Diagrama de falla bifásica.....                                                                                                | 29 |
| Figura 2.4. Diagrama de conexión de una falla bifásica a tierra .....                                                                      | 30 |
| Figura 2.5. Diagrama de conexión de una falla trifásica .....                                                                              | 31 |
| Figura 2.6. Entorno del software DIGSILENT 15.1.7 y funciones disponibles .....                                                            | 34 |
| Figura 2.7. Protecciones mínimas que considerar para transformadores pequeños .....                                                        | 39 |
| Figura 2.8. Proceso de ajuste y coordinación de protección .....                                                                           | 41 |
| Figura 2.9. Simulación de fallas en subestación pequeña .....                                                                              | 45 |
| Figura 3.1. Red eléctrica actual. S.E. Pisac, S.E. Paucartambo y S.E. Salvación .....                                                      | 47 |
| Figura 3.2. Diagrama Unifilar S.E. Paucartambo – Actual .....                                                                              | 48 |
| Figura 3.3. Diagrama Unifilar S.E. Salvación – Actual .....                                                                                | 49 |
| Figura 3.4. S.E. Paucartambo al 2019 .....                                                                                                 | 50 |
| Figura 3.5. S.E. Salvación al 2019 .....                                                                                                   | 52 |
| Figura 3.6. Diagrama Unifilar S.E. Pillcopata – Previsto para su ingreso. ....                                                             | 53 |
| Figura 3.7. S.E. Pillcopata prevista para el 2025.....                                                                                     | 54 |
| Figura 3.8. Recorrido de la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación. ....                                                           | 56 |
| Figura 3.9. Modelamiento de la red eléctrica en DigSILENT.....                                                                             | 57 |
| Figura 3.10. Equipos de protección existentes en al área de influencia del estudio.....                                                    | 59 |
| Figura 3.11. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Pisac.....                                                                       | 60 |
| Figura 3.12. Curvas de ajustes de protección 50N/51N – S.E. Pisac .....                                                                    | 61 |
| Figura 3.13. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Paucartambo .....                                                                | 63 |
| Figura 3.14. Curvas de ajustes de protección 50N/51N – S.E. Paucartambo.....                                                               | 64 |
| Figura 3.15. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Salvación.....                                                                   | 65 |
| Figura 3.16. Curvas de ajustes de protección 50N/51N – S.E. Salvación.....                                                                 | 66 |
| Figura 4.1. Diagrama unifilar simplificado: Ubicación de equipos de protección.....                                                        | 71 |
| Figura 4.2. Diagrama unifilar y flujo en máxima demanda: Línea L-3303 en 33 kV y<br>subestaciones Paucartambo, Salvación y Pillcopata..... | 73 |
| Figura 4.3. Ajustes Propuesto - Curva de coordinación de protección 50/51 de la S.E.<br>Pillcopata. ....                                   | 75 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.4. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección 51. Entre la S.E. Paucartambo, Línea y S.E. Pillcopata.....  | 76 |
| Figura 4.5. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección entre S.E. Paucartambo y S.E. Pisac. ....                    | 77 |
| Figura 4.6. Ajustes Propuesto - Curva de coordinación de protección 50N/51N de la S.E. Pillcopata. ....                          | 79 |
| Figura 4.7. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección 51N. Entre la S.E. Paucartambo, Línea y S.E. Pillcopata..... | 80 |
| Figura 4.8. Ajustes propuestos 51N. Curva de coordinación de protección entre S.E. Paucartambo y S.E. Pisac. ....                | 81 |

## TERMINOLOGÍA

---

|          |                                                                             |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| A        | : Amperio                                                                   |
| AMT      | : Alimentador de Media Tensión                                              |
| C.H.     | : Central hidroeléctrica. En el contexto del estudio se refiere a la GD     |
| ELSE     | : Empresa distribuidora: Electro Sur Este S.A.A.                            |
| IEC      | : International Electrotechnical Commission.                                |
| GD       | : Generación Distribuida (para el estudio son las minis C.H.)               |
| I>       | : Sobrecorriente temporizado de fases. Notación según el Standar IEC        |
| I>>      | : Sobrecorriente instantáneo de fases. Notación según el Standar IEC        |
| Io>      | : Sobrecorriente temporizado a tierra. Notación según el Standar IEC        |
| Io>>     | : Sobrecorriente instantáneo a tierra. Notación según el Standar IEC        |
| Ipickup  | : Valor ajustado para la corriente de disparo (en el software DIgSILENT)    |
| kA       | : Kilo amperio                                                              |
| kV       | : Kilo voltio                                                               |
| kW       | : Kilo watts                                                                |
| MT       | : Media tensión                                                             |
| NTCSE    | : Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos                      |
| REP      | : Empresa transmisora: Red de Energía del Perú S.A.                         |
| S.E.     | : Subestación Eléctrica                                                     |
| SED      | : Subestación de distribución                                               |
| SEIN     | : Sistema Eléctrico Interconectado Nacional                                 |
| SEL-351R | : Relé de protección del fabricante SCHWEITZER de serie 351R                |
| SI0X     | : Alimentador 0X de 10.5 kV de la S.E. Sicuani (X = 1, 2, 3 y 5)            |
| SIELSE   | : Sistema de información de ELSE (Sistema de base de datos de ELSE)         |
| SLI      | : Sección de línea, se refiere al tramo de línea del AMT                    |
| TA0X     | : Alimentador 13.2 kV (X = 2, 3 y 4) y 22.9 kV (X = 5, 6 y 7) S.E. Tamburco |
| Tpset    | : Dial de la curva de sobrecorriente de tiempo inverso (en DIgSILENT)       |
| Tset     | : Tiempo de actuación de la protección instantánea                          |
| 50       | : Sobrecorriente instantáneo de fases                                       |
| 50N      | : Sobrecorriente instantáneo a tierra                                       |
| 51       | : Sobrecorriente temporizado de fases                                       |
| 51N      | : Sobrecorriente temporizado a tierra                                       |
| 67       | : Sobrecorriente direccional fase - fase                                    |
| 67N      | : Sobrecorriente direccional fase - tierra                                  |

## RESUMEN

---

El presente trabajo de tesis aborda el desarrollo y análisis de un sistema de protección y coordinación en la red eléctrica comprendida entre la S.E. Paucartambo, Pillcopata y Salvación, por la inserción o conexión de la nueva subestación Pillcopata, con el objetivo de mejorar la seguridad y la eficiencia operativa del sistema eléctrico. El proyecto se centra en el modelado y simulación utilizando el software especializado, permitiendo la evaluación detallada de las condiciones de operación y las respuestas de los dispositivos de protección.

Se ha llevado a cabo un estudio de las curvas de coordinación de protección, incluyendo el análisis de la configuración y ajuste de los relés de protección. La metodología empleada incluye simulaciones para determinar el comportamiento de la protección, garantizando la selectividad y la capacidad de respuesta de los sistemas de protección ante fallas.

Los resultados obtenidos demuestran que una adecuada coordinación y ajustes de protección puede minimizar las interrupciones y optimizar la operación de la red. Además, se identifican la necesidad de realizar reajustes a las protecciones existentes aguas arriba de los de la S.E. Pillcopata. Finalmente, se proponen recomendaciones prácticas para la implementación en el sistema de protección existente.

Palabras Clave: Sistema, protección, coordinación, inserción, simulación, ajustes.

*Br. Orlando Huamaní Atanacio*

*Br. Roy Roger Ccopa Quesso*

## **CAPÍTULO 1.**

### **GENERALIDADES**

---

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se plantea la problemática del estudio existente en la protección de la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación, por la inserción de la subestación eléctrica (S.E.) Pillcopata, el mismo que se conectará en derivación de la línea en mención.

Se inicia con la breve descripción del ámbito de estudio, aunque ésta, será ampliada en el Capítulo 3; en seguida, se realiza el planteamiento y la formulación del problema, se plantean los objetivos (general y específicos), la hipótesis, las variables de estudio, los alcances y limitaciones, justificación e importancia. También es específica la metodología que se sigue en la presente tesis.

#### **1.2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN**

El ámbito de estudio y aplicación se ubica en la Región Cusco, Provincia Paucartambo, Distrito de Kosñipata y en la Región Madre de Dios, Provincia y distrito Manu. Comprende la línea de subtransmisión L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación. La línea estará dividida dos tramos: El primero de 73 km, desde la S.E. Paucartambo hacia S.E. Pillcopata, ubicado en el distrito de Kosñipata y el segundo tramo de 18 km, desde la S.E. Pillcopata hacia la S.E. Salvación en el distrito Manu. La línea se encuentra en operación, así como la S.E. Salvación. La S.E. Pillcopata, parcialmente en servicio; esto es, la línea se encuentra operando en 22.9 kV desde Paucartambo y la S.E. Pillcopata, opera sin el transformador de potencia 33/22.9 kV, es decir solo en nivel de 22.9 kV. Sin embargo, su puesta en servicio con tensión de 33 kV está prevista, aunque no se tiene fecha estimada.

El sistema eléctrico en estudio es radial, inicia en la S.E. Pisac y, a través del alimentador en 22.9 kV, Pisac 03 (PI03), se suministra a la S.E. Paucartambo, donde existe dos alimentadores en el mismo nivel de tensión: Paucartambo 01 y 02 (PA01 y PA02 respectivamente) y una tercera, puesta en operación recientemente (marzo 2019), donde está conectado el transformador elevador de 33/22.9 kV de 5 MVA. En nivel de 33 kV, de la

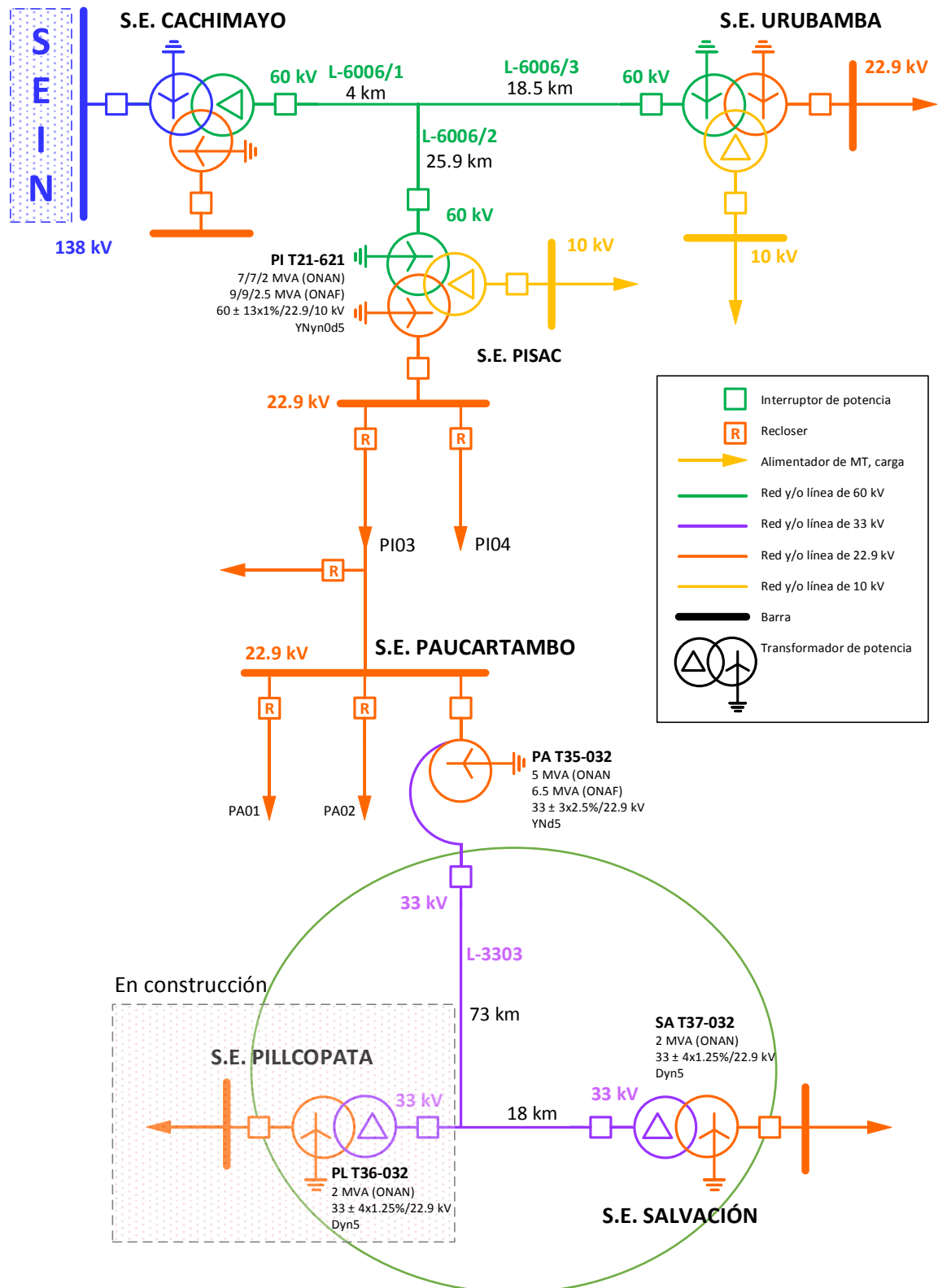
misma subestación, inicia su recorrido la línea L-3303, con una longitud de 73 km, hasta la S.E. de Pillcopata, donde está previsto la instalación del transformador reductor de 33/22.9 kV de 2 MVA para suministrar energía a las localidades del distrito de Kosñipata en redes de 22.9 kV. Desde la S.E. Pillcopata, la línea continúa su recorrido hasta la S.E. Salvación, donde se encuentra un transformador reductor de 33/22.9 kV para suministrar energía a las localidades Salvación y comunidades aledañas en redes de 22.9 kV. En la Figura 1.1, se muestra el sistema eléctrico descrito.

### **1.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

Paucartambo es una de las trece provincias que conforman el Departamento de Cusco, bajo la administración del Gobierno regional del Cusco. Limita al norte con el Departamento de Madre de Dios, al este y al sur con la Provincia de Quispicanchi, y al oeste con la Provincia de Calca y la Provincia de La Convención.

La provincia de Paucartambo, tiene como capital a la ciudad del mismo nombre y se ubica al Sur Este de la Cordillera de los Andes peruanos, en el Departamento del Cusco, se encuentra a una altura 3,017 m.s.n.m. y a una distancia 110 Km. de la ciudad del Cusco (duración del viaje 3 horas a velocidad moderada). Esta localidad se encuentra en un valle, por donde confluyen el río Mapacho con el Río Qenqomayu. el Pueblo tiene construcciones de estilo colonial español con calles estrechas y empedradas con casonas de adobe de color blanco y los portones y balcones de color azul.

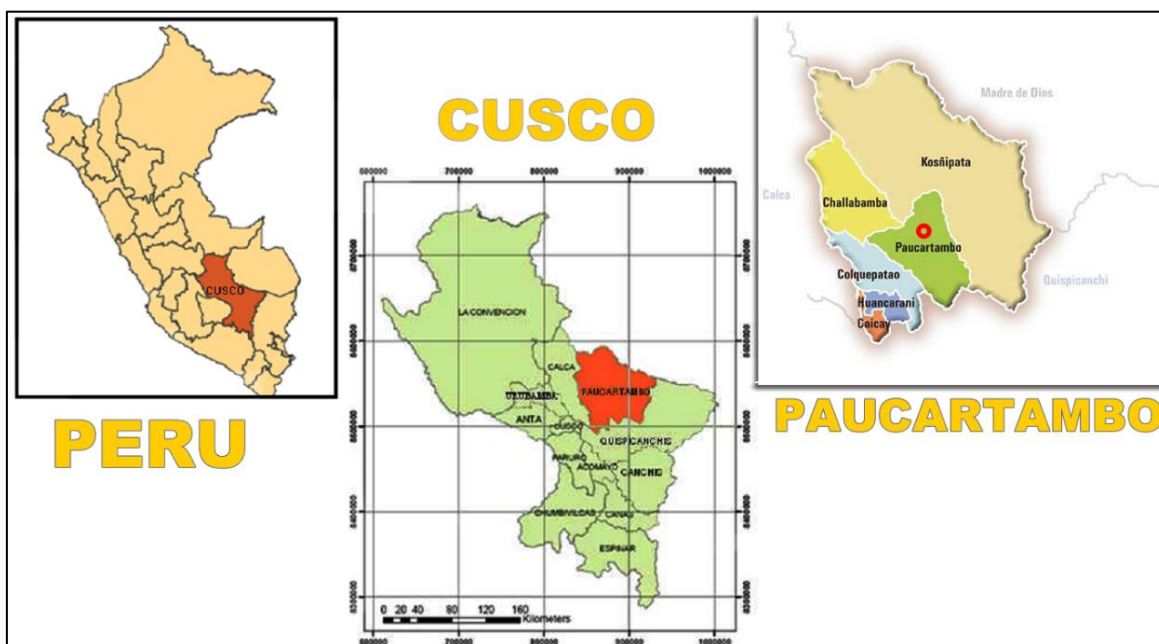
**Figura 1.1. Ámbito de estudio y aplicación: Sistema Eléctrico Actual y Proyectado**



Fuente: Elaboración propia en base a datos brindados por Electro Sur Este S.A.A.



**Figura 1.2. Ubicación geográfica de la provincia de Paucartambo**



Fuente: Imagen tomada de la página del Gobierno Regional de Cusco

#### **1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El estudio de coordinación de protecciones actual, titulada: “Estudio de coordinación de protección a nivel empresarial” que administra la empresa concesionaria, no contempla la red existente desde la S.E. Paucartambo hasta la S.E. Salvación, conectada recientemente. El mencionado estudio no incluye ajustes de los equipos de protección, las modificaciones en las instalaciones hasta la fecha y los futuros (EdP Estudios S.A.C., Diciembre, 2017).

La incorporación de nuevos equipos (líneas, transformadores, etc.) como el caso que se dará, la conexión de la S.E. Pillcopata en derivación de la línea L-3303 (Paucartambo – Salvación) a 73 km de S.E. Paucartambo (Figura 1.1), el mismo que se encuentra en la etapa de construcción; requieren de estudios para su correcta operación durante el tiempo que permanecerá en servicio. Uno de los estudios importantes es el estudio de coordinación de protecciones.

El problema central se enfoca en la falta de actualización y adaptación del sistema de protección en la red eléctrica que conecta las subestaciones Paucartambo, Pillcopata y Salvación. Actualmente, el estudio de coordinación de protecciones vigente no considera la reciente incorporación de la línea de 33 kV ni los nuevos equipos asociados, como el transformador elevador en la S.E. Paucartambo, la S.E. Pillcopata y S.E. Salvación. Esto genera un vacío técnico crítico, ya que la coordinación de protecciones debe ajustarse a la

nueva topología de la red para manejar con precisión las corrientes de cortocircuito y garantizar un despeje adecuado de las fallas.

Por tanto, surge la necesidad de realizar el estudio de coordinación de protecciones en el sistema eléctrico comprendido entre las subestaciones de Paucartambo – Pillcopata – Salvación, pues los cambios en la red guardan relación directa la topología de la red con las corrientes de cortocircuitos y en consecuencia los ajustes de protecciones deben estar mejor adaptados con mayor grado de exactitud para el despeje de fallas que se puedan presentar. La conexión de la S.E. Pillcopata y su operación en derivación dentro de una red radial hace aún más esencial un estudio de coordinación de protecciones actualizado.

Desafíos técnicos: Actualmente, el sistema de protección existente no incluye los ajustes necesarios para la nueva configuración, generando riesgos operativos y posibles fallas no gestionadas adecuadamente.

Necesidad del estudio: La integración de la S.E. Pillcopata modifica la topología de la red, exigiendo una nueva evaluación de la coordinación de protecciones para garantizar selectividad, rapidez y confiabilidad.

## **1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.5.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Cómo garantizar la correcta operación y confiabilidad del sistema eléctrico mediante un estudio de coordinación de protecciones para la línea L-3303 en 33 kV (Paucartambo – Salvación) ante la inclusión de la Subestación Eléctrica Pillcopata?

### **1.5.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

1. ¿Cuál es el desempeño actual del sistema eléctrico, considerando su configuración y los ajustes de coordinación de protección existentes?
2. ¿Qué ajustes de protección son necesarios para la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo - Salvación, con la incorporación de la Subestación Eléctrica Pillcopata, ¿y cómo validar su efectividad mediante simulaciones?

## **1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.6.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar y optimizar la coordinación de protecciones en la línea L-3303 a 33 kV (Paucartambo – Salvación) mediante un estudio técnico que incorpore el impacto de la Subestación Eléctrica Pillcopata, con el objetivo de garantizar la selectividad, confiabilidad y eficacia del sistema de protección.

### **1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar el estado actual del sistema eléctrico, incluyendo la configuración existente y la coordinación de protecciones, para identificar deficiencias y oportunidades de mejora.
2. Proponer ajustes de protección para la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación, por la inserción de la S.E. Pillcopata y verificar su desempeño a través de simulaciones. Y Validar los ajustes propuestos mediante simulaciones técnicas que evalúen su desempeño en escenarios de operación de máxima demanda.

## **1.7. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO**

El cambio de la topología en la red, conexión de la S.E. Pillcopata, demanda que se debe realizar un nuevo estudio de coordinación de protección, de la red eléctrica comprendido entre las subestaciones de Paucartambo – Pillcopata – Salvación, tomando en consideración la inserción del transformador reductor de 33/22.9 kV de 2 MVA.

El transformador en la S.E. Pillcopata, requiere de un sistema de protección y que está debe coordinar con la protección ubicada en la S.E. Paucartambo para su correcta actuación y despeje de falla que podrían originarse en la misma subestación y/o aguas debajo de la subestación, es decir en la red distribución de 22.9 kV.

## **1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

### **1.8.1. ALCANCES**

El estudio de coordinación de protección comprenderá la red eléctrica comprendido entre las subestaciones de Paucartambo y Salvación, por la inserción de la S.E. Pillcopata, y ésta, deberá coordinar con los ajustes de protección de la S.E. Paucartambo en nivel de 22.9 kV.

Los ajustes para la coordinación de protección que se pretende plantear son de subestaciones eléctricas de Paucartambo, Pillcopata y Salvación, donde se encuentran equipos de protección (interruptor - relé) en el nivel de 22.9 kV y 33 kV, para proteger a los

transformadores de potencia (Ver Figura 1.1). El interruptor y relé en el nivel de 33 kV, en la S.E. Paucartambo, es también para la protección de la línea L-3303.

En el estudio se destacará los siguientes puntos:

- Análisis de operación en estado estacionario: Flujos de carga en los niveles de 60 kV, 33 kV, 22.9 kV. Sin embargo, las redes de los alimentadores de MT, se considerarán como cargas puntuales en cada subestación de transformación AT/MT (de alta tensión a media tensión).
- Determinación de los niveles de corriente de cortocircuito para los escenarios de Máxima y Mínima demanda.
- Revisión de los ajustes de los relés de protección actual en la S.E. Pisac y S.E. Paucartambo.
- Realizar simulaciones en software especializado de los ajustes de protección con el fin de validarlos.

### **1.8.2. LIMITACIONES**

El estudio plantea ajustes de protección para las subestaciones eléctricas de Paucartambo, Pillcopata y Salvación, para proteger a los transformadores de las subestaciones indicadas y la línea de 33 kV.

El estudio que se plantea no es de carácter experimental, pues no se realizará ajustes en los relés, sino, realiza los cálculos necesarios para una correcta coordinación de protecciones.

## **1.9. HIPÓTESIS**

### **1.9.1. HIPÓTESIS GENERAL**

El estudio de coordinación de protecciones para la línea L-3303 a 33 kV (Paucartambo – Salvación), que incorpore la Subestación Eléctrica Pillcopata, optimizará la operación y confiabilidad del sistema eléctrico, garantizando la selectividad, confiabilidad y eficacia en la respuesta ante fallas.

### **1.9.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

1. El análisis del estado actual del sistema eléctrico y de la coordinación de protecciones permitirá identificar deficiencias en la configuración existente, estableciendo una base técnica sólida para su mejora.

2. La propuesta de ajustes de protección considerando la integración de la Subestación Eléctrica Pillcopata optimizará la coordinación de protecciones, garantizando la desconexión selectiva y oportuna ante contingencias. La validación de los ajustes propuestos mediante simulaciones demostrará su efectividad en escenarios de máxima demanda, mejorando el desempeño operativo y reduciendo los riesgos asociados a fallas

## 1.10. VARIABLES E INDICADORES

Se plantea dos tipos de variables, independientes y dependientes con sus respectivos indicadores:

**Tabla 1.1. Variables e Indicadores Independientes**

| <b>Variables independientes</b> | <b>Indicadores</b>              |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Inserción de la subestación     | Topología de la red             |
|                                 | Demanda (MW)                    |
|                                 | Potencia de Cortocircuito (MVA) |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1.2. Variables e Indicadores Dependientes**

| <b>Variables Dependientes</b> | <b>Indicadores</b>                                |
|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| Coordinación de Protección    | Selectividad (Tiempo y corriente de ajuste (S, A) |
|                               | Sensibilidad (Corriente mínimo ajuste, A)         |
|                               | Seguridad (Actúa: Si, No)                         |

Fuente: Elaboración propia

## 1.11. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población del presente estudio abarca el sistema eléctrico compuesto por la línea L-3303 en 33 kV y las subestaciones eléctricas de Paucartambo, Pillcopata y Salvación, localizadas en las regiones de Cusco y Madre de Dios, Perú. Este sistema incluye los equipos de protección, líneas de transmisión y transformadores asociados, que deben ser considerados para una adecuada coordinación de la protección en el contexto de la inserción de la nueva Subestación Pillcopata.

La muestra está constituida por los ajustes de protección específicos en las subestaciones eléctricas de Paucartambo, Pillcopata y Salvación, así como en la línea L-3303. Se seleccionarán los equipos de protección más relevantes, tales como relés, interruptores y

transformadores, que requieren un análisis detallado para garantizar una correcta coordinación y selectividad en el sistema de protección, teniendo en cuenta la nueva configuración con la inclusión de la subestación en construcción.

## **1.12. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

Está el **Estudio de Coordinación de Protecciones**, informe N°: EDP-ES-026-17, Contratación del Servicio de Consultoría – Estudio de Coordinación de Protección Nivel Empresarial, realizado por la empresa EdP Estudios S.A.C., para la empresa distribuidora Electro Sur Este S.A.A., en fecha 20/12/2017 (última revisión). El objetivo del estudio mencionado es el de analizar los esquemas de protección del sistema eléctrico de Cachimayo – Urubamba – Pisac – Paucartambo.

Sin embargo, el estudio mencionado, no contempla la red existente, que viene a ser la conexión del transformador de 33/22.9 kV en la S.E. Paucartambo, la línea de 33 kV L-3303 (Paucartambo – Salvación); la S.E. Salvación y la S.E. Pillcopata.

## **1.13. METODOLOGÍA**

### **1.13.1. CARACTERÍSTICAS DE LA INVESTIGACIÓN**

De acuerdo con el tipo, es una **Investigación Aplicada**, pues el estudio está orientado a la comprensión y solución de la problemática actual, en base al marco teórico conocido y existente en diferentes bibliografías.

El nivel de investigación es **Explicativa** pues el estudio establece relaciones de causa – efecto, en este caso, la causa viene a ser el cambio de topología de la red (que no fue considerada en estudios anteriores) así como las instalaciones previstas para el futuro y el efecto sería la afectación en el desempeño del sistema de protecciones y que está además será una manera de probar la hipótesis planteada. Es preciso aclarar que de acuerdo a la presentación del Dr. Marroquín, la investigación explicativa es la que se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa - efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas como de los efectos, mediante la prueba de hipótesis. (Dr. Marroquín Peña, 2012)

### **1.13.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

**Recopilación Documental:** Se recopila información proveniente de documentos técnicos, estudios previos, normas nacionales e internacionales (como las del COES y la IEC), manuales de equipos de protección y reportes de la empresa concesionaria. Esta técnica

permite obtener datos específicos sobre la configuración actual del sistema, características de los equipos y ajustes de protección vigentes.

**Análisis de Diagramas y Planos Eléctricos:** Se revisa los diagramas unifilares y planos eléctricos proporcionados por la empresa concesionaria y otros estudios previos. Esta información es fundamental para la correcta modelación del sistema eléctrico y la identificación de puntos críticos en la coordinación de la protección.

**Simulación Computacional:** Se realiza simulaciones mediante el software Power Factory DIgSILENT para modelar el sistema eléctrico, llevar a cabo estudios de flujo de carga y cortocircuito, y evaluar el comportamiento de los ajustes de protección. Estas simulaciones permitirán analizar distintos escenarios de operación, con máxima y mínima demanda, y verificar la eficacia de los ajustes propuestos

### 1.13.3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el estudio, de acuerdo con los objetivos, se hace uso de las siguientes herramientas informáticas:

- **Power Factory DIgSILENT** (Versión 15.1.7). Software especializado para realizar simulación del sistema eléctrico en estudio y verificar el comportamiento de los ajustes de protección ante fallas.
- **AutoCAD**. Software para revisión y edición de planos y diagramas unifilares
- **Microsoft Word**. Software para edición de textos.
- **Microsoft Visio**. Software para edición de figuras y diagramas.

## **CAPÍTULO 2.**

### **MARCO TEÓRICO**

---

#### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo presenta en forma general el marco conceptual y teórico concernientes al estudio. Diferentes conceptos, términos, metodologías, criterios, información y datos existentes en diferentes textos normativos, manuales y guías tienen la finalidad de brindar soporte y orientación para el desarrollo del presente estudio.

La información brindada, está enfocado en temas de Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia, implica señalar lo importante que es tener una coordinación de protección y lo que significa, los objetivos que tienen estas, funciones, criterios que se debe tener en cuenta y los equipos que actualmente se usan en un sistema de protección.

Es preciso señalar que la información contenida se encuentra referenciada, citando la bibliografía.

#### **2.2. ANTECEDENTES**

Está el **ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES**, informe N°: EDP-ES-026-17, Contratación del Servicio de Consultoría – Estudio de Coordinación de Protección Nivel Empresarial, realizado por la empresa EDP Estudios S.A.C., para la empresa distribuidora Electro Sur Este S.A.A., en fecha 20/12/2017 (última revisión). El objetivo del estudio mencionado es el de analizar los esquemas de protección del sistema eléctrico de Cachimayo – Urubamba – Pisac – Paucartambo.

Sin embargo, el estudio mencionado arriba, no contempla la red existente, que viene a ser la conexión del transformador de 33/22.9 kV en la S.E. Paucartambo, la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación; la S.E. Salvación y la S.E. Pillcopata.

Otro documento importante a considerar es el Estudio de Coordinación de Protecciones titulado: “**ACTUALIZACION DEL ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO NACIONAL AÑO 2018**” (en adelante ECP 2018) realizado por la empresa EDP Estudios por encargo del COES SINAC y se encuentra publicado en su página web: <https://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/Estudios/OperacionSEIN>. El estudio en mención



se realiza cada cuatro (04) años y de acuerdo a lo mencionado en el Informe Ejecutivo tiene los siguientes objetivos:

- Proporcionar a las empresas integrantes del SEIN, los requerimientos y criterios para realizar los ajustes y coordinación de los sistemas de protección;
- Entregar a los integrantes del SEIN y a las entidades que corresponda, los resultados de actualización del Estudio de Coordinación de las Protecciones, con los ajustes para los relés de protección coordinables del sistema.
- Disponer de un Estudio de Coordinación de las Protecciones del SEIN, que sirva como referencia para su empleo en futuros estudios de actualización o ingreso de nuevas instalaciones al SEIN;
- Uniformizar los criterios de ajuste y filosofías de protección y presentarlas en memorias de cálculo para las protecciones de una línea de transmisión y las protecciones de sobre corriente de subestaciones y centros de generación.

Los alcances del estudio mencionado antes, comprende sistemas de protección coordinables (como protección de distancia y de sobrecorriente) de las instalaciones de las empresas de generación y transmisión del SEIN, que son integrantes del COES y los sistemas de protección de las instalaciones que son fronteras con las instalaciones de las empresas de Distribución y Clientes Libres.

Dentro de la documentación del ECP 2018 se puede encontrar la base de datos de los equipos (líneas, transformadores, reactores, generadores, etc), modelo de la red en el software DIGSILENT, Resultados de flujo de potencia y cortocircuito, tiempos críticos de despeje de fallas, diagramas unifilares, memorias de cálculo y entre otras, los mismos que el lector puede revisar en la página web del COES.

Estudios parecidos al que se realiza, se encuentra el “**ESTUDIO DE COORDINACION DE PROTECCIONES DE LA LINEA S.E. CHIMBOTE 1 – S.E. SANTA (L- 1116) EN 138 kV**” realizado por la empresa INGELMEC S.A. para la empresa distribuidora Hidrandina S.A. El documento indicado tiene el objetivo de obtener los ajustes adecuados de los equipos de protección en el área de estudio cumpliendo con los requisitos básicos de la ingeniería de protecciones, los cuales son: sensibilidad, seguridad, rapidez, selectividad y confiabilidad. Dentro de sus alcances esta: Recopilación de Información Técnica, Diagramas Unifilares de Protección, Cálculo de Flujo de Carga, Calculo de Corriente de Cortocircuito, Determinación de Ajustes de los relés, Recomendaciones y Conclusiones. A diferencia del

estudio realizado en la presente tesis, la línea en el mencionado estudio es aérea de una longitud aproximada de 8.4 km. (INGELMEC, 2011). En el estudio mencionado, se encuentra los cálculos para las protecciones de distancia 21/21N, sobrecorriente 50/51, 50N/51N, 67/67N.

Para fines académicos, la información contenida en los estudios mencionados en los anteriores párrafos, son utilizadas para el desarrollo de la presente tesis.

También se encuentra el estudio definitivo del proyecto denominado: “**AMPLIACIÓN SET QUENCORO, L.T. 138 kV QUENCORO – PARQUE INDUSTRIAL Y SET PARQUE INDUSTRIAL, CUSCO**” presentada por la empresa Ingeniería & Productividad, realizado para ELSE. El acceso que se tuvo al estudio en mención es a la Revisión D<sup>1</sup>, realizada en mayo del 2019 y cuenta de cinco (05) volúmenes: Memoria descriptiva, Metrado, Planos, Calculo Justificativos y Adecuación de Alimentadores. En la memoria descriptiva, se tiene el desarrollo de la ingeniería definitiva para la línea de transmisión y para el diseño de las subestaciones: Parque Industrial y la ampliación en la S.E. Quencoro. El objetivo de dicho documento es determinar los trabajos electromecánicos y civiles necesarios que se ejecutaran en la construcción. Los alcances del documento son: Diseño de la línea de transmisión 138 kV (Quencoro – Parque Industrial); diseño de la ampliación de una bahía de línea en la S.E. Quencoro, para alimentar la nueva S.E. Parque Industrial, y diseño de la nueva S.E. Parque Industrial. Sin embargo, no abarca el tema del estudio de coordinación de protecciones.

## **2.3. ANALISIS DE ESTADO ESTACIONARIO EN SISTEMAS ELECTRICOS**

### **2.3.1. ANALISIS DE FLUJO DE CARGA**

El análisis de flujo de carga es una herramienta esencial en los sistemas eléctricos de potencia para determinar las condiciones operativas estacionarias en términos de tensiones, corrientes y potencias activas/reactivas. Este análisis es clave para evaluar la operación de las redes bajo condiciones normales, identificar posibles problemas y definir ajustes en elementos críticos como los sistemas de protección.

El flujo de carga es una etapa inicial y crítica para los estudios de coordinación de protecciones, ya que proporciona los parámetros básicos para determinar los ajustes de los

---

<sup>1</sup> Cuarta revisión del Estudio Definitivo “AMPLIACIÓN SET QUENCORO, L.T. 138 kV QUENCORO – PARQUE INDUSTRIAL Y SET PARQUE INDUSTRIAL, CUSCO”

sistemas de protección. Entre estos parámetros están las corrientes de operación, tensiones nominales y niveles de carga. Además, el análisis de flujo de carga combinado con cálculos de cortocircuito asegura que las protecciones respondan de manera adecuada a fallas, garantizando la selectividad y confiabilidad del sistema. (EdP Estudios S.A.C., Diciembre, 2017)

El flujo de carga se realiza utilizando metodologías y herramientas computacionales que permiten modelar y simular el comportamiento del sistema eléctrico. Su resultado es indispensable para garantizar la estabilidad, eficiencia y confiabilidad de las redes eléctricas.

Entre sus aplicaciones principales se encuentran (Anderson, Henville, Rifaat, Johnson, & Meliopoulos, 2022):

- Dimensionamiento de Equipos: Asegura que los transformadores, líneas y generadores operen dentro de sus capacidades nominales.
- Verificación de Límites de Operación: Garantiza que las tensiones y corrientes se mantengan dentro de los márgenes permitidos por las normas y equipos
- Evaluación de la Estabilidad Operativa: Detecta posibles problemas de caídas de tensión o sobrecargas en condiciones normales o contingencias.
- Base para Análisis de Cortocircuitos: Proporciona datos iniciales para estudios de protección y coordinación de equipo

Criterios para Realizar un Flujo de Carga (COES SINAC, Julio 2018):

- Equilibrio de Potencia: La generación total debe ser igual a la suma de las demandas más las pérdidas del sistema.
- Tensiones Admisibles: Las tensiones en todas las barras deben estar dentro del rango de operación especificado ( $\pm 5\%$  del valor nominal).
- Cargabilidad de líneas: Las corrientes que circulan por las líneas no deben exceder su capacidad térmica o límite de diseño.
- Cargabilidad de transformadores: Las corrientes que circulan por los transformadores no deben exceder su capacidad térmica o límite de diseño. Para el estudio no se admite superar el 100 %.
- Simulación de Escenarios: Es importante analizar condiciones de máxima y mínima demanda para evaluar el desempeño del sistema en diferentes circunstancias operativas

Hoy en día, el análisis de flujo de carga se lleva a cabo mediante el uso de software especializado, como NEPLAN, PowerFactory DIgSILENT, PSCAD y ETAP, que se encuentran entre los más utilizados. En el caso de Perú, el COES, encargado de la operación del sistema eléctrico y de la planificación del sistema de transmisión, emplea el software PowerFactory DIgSILENT para gestionar la operación y realizar la planificación del SEIN en horizontes de corto, mediano y largo plazo. Estas plataformas permiten:

- Modelar redes eléctricas complejas: Incluyendo generadores, líneas, transformadores y cargas.
- Simular condiciones reales: Configuraciones normales y contingencias.
- Implementar el método completo: Recomendado para estudios avanzados como la coordinación de protecciones, ya que considera todos los flujos y corrientes presentes en el sistema bajo condiciones normales y de falla

### 2.3.2. ANALISIS DE CORTOCIRCUITO

Un **cortocircuito** ocurre cuando dos o más puntos del sistema eléctrico que normalmente están a diferente potencial entran en contacto de manera accidental, a través de una impedancia baja o prácticamente nula. Por esta razón, el análisis de cortocircuitos es un aspecto fundamental tanto en la planificación como en la operación de una red eléctrica, ya que influye directamente en decisiones críticas, como la selección adecuada de conductores, soportes y sistemas de protección. (GÓMEZ EXPOSITO, 2002, pág. 463).

Los sistemas eléctricos de potencia y los sistemas industriales están diseñados para garantizar un suministro seguro y confiable de energía a las cargas. Un aspecto crítico en el diseño y operación de estos sistemas es la gestión efectiva de los cortocircuitos. A pesar de los esfuerzos por minimizar su ocurrencia, los cortocircuitos pueden presentarse. Estas fallas suelen generar flujos de corriente elevados e incontrolados que, si no se detectan y controlan oportunamente, pueden provocar daños en los equipos, interrupciones extensas en el sistema (más allá de la sección afectada) y riesgos para la seguridad del personal. Por esta razón, un sistema eléctrico bien diseñado debe ser capaz de aislar las fallas de manera segura, minimizando tanto los daños a los equipos como las interrupciones del servicio (DIgSILENT GmbH, 2014, pág. 449)

El análisis de cortocircuito es una herramienta esencial en la ingeniería eléctrica para evaluar las corrientes que circulan en un sistema durante condiciones de falla. Este estudio es fundamental para garantizar la seguridad de las instalaciones, la integridad de los equipos y la continuidad del servicio eléctrico. El análisis de cortocircuito proporciona datos clave para

el diseño de sistemas de protección, como los ajustes de relés, interruptores y fusibles, asegurando una adecuada coordinación y selectividad. (RAMIREZ CASTANO, 2003)

El análisis de cortocircuito calcula las corrientes que se generan durante dichas fallas, las cuales pueden ser significativamente mayores a las corrientes nominales. Estas corrientes se clasifican en:

**Corriente simétrica:** Asociada a fallas trifásicas, donde las tres fases tienen la misma magnitud y están desfasadas 120 grados entre sí. (Blackburn & Domin, 2007)

**Corriente asimétrica:** Presenta componentes de secuencia positiva, negativa y cero, como ocurre en fallas monofásicas o bifásicas a tierra (Blackburn & Domin, 2007)

Los cálculos de cortocircuito se realizan considerando las características de los elementos del sistema eléctrico y utilizando métodos analíticos o computacionales. En el presente estudio se hará uso del **Método completo:** Implementado en software como DIGSILENT PowerFactory, evalúa todas las condiciones de falla posibles y considera las características detalladas de los equipos, proporcionando resultados más precisos

#### 2.3.2.1. Clasificación de fallas en sistemas eléctricos

En su obra Analysis of Faulted Power Systems, Paul M. Anderson describe tres tipos principales: **fallas shunt, fallas en serie y fallas simultáneas.**

Las **Fallas Shunt**, también conocidas como fallas en derivación, son las más comunes que se presentan en los sistemas eléctricos. Estas fallas ocurren cuando se produce un cortocircuito entre conductores o entre un conductor y tierra. Una de las características más destacadas de este tipo de fallas es el aumento significativo de la corriente y la caída de tensión que ocasionan en el sistema. (ANDERSON, 1995, pág. 37)

Las fallas shunt incluye varios tipos de fallas, las cuales son:

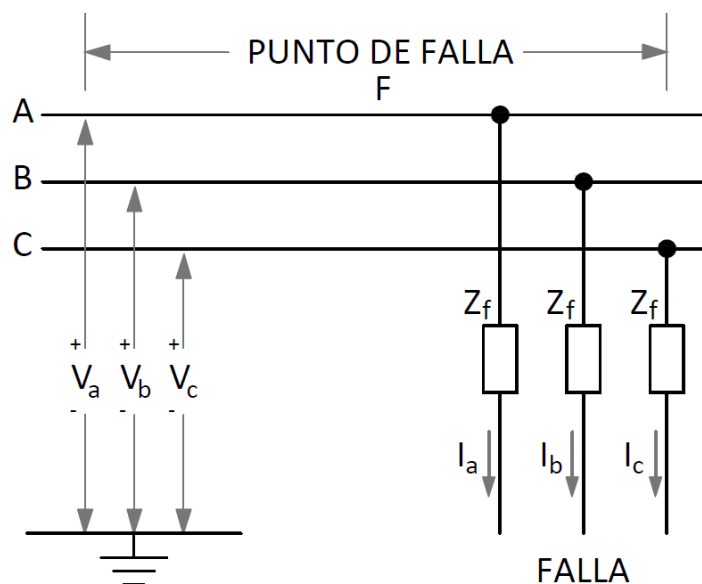
- **Falla monofásica, fase a tierra.** Se presenta cuando ocurre un cortocircuito entre una fase (R, S o T) y tierra.
- **Falla bifásica, fase-fase.** Se presente cuando ocurre un cortocircuito entre dos fases (R-S, R-T o S-T), se puede dar a través de una impedancia de falla o no.
- **Falla bifásica a tierra, fase-fase a tierra.** Se presenta cuando ocurre un cortocircuito entre dos fases y a tierra (R-S-N, R-T-N o S-T-N) La falla se puede dar con una impedancia de falla a tierra y también, con impedancia entre las fases.

- **Falla trifásica.** Se presenta cuando ocurre un cortocircuito entre las tres fases de la red eléctrica (RST o RSTN) esta pueda ser a tierra o no.

Se designan las corrientes que fluyen de las fases: A, B y C hacia afuera del sistema original balanceado, como se puede visualizar en la Figura 2.1. Diagrama del circuito del punto de falla las tres fases del sistema trifásico en la porción de la red donde ocurre la falla (Punto de Falla: F)

El flujo de corriente en cada línea hacia el punto de falla se muestra mediante flechas en los tres conductores de un sistema trifásico. Los segmentos que transportan las corrientes:  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  se pueden conectar entre sí para representar los distintos tipos de fallas. Las tensiones de fase a tierra en el punto de falla se denominan  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  mientras que  $Z_f$  representa a la impedancia de falla.

**Figura 2.1. Diagrama del circuito del punto de falla**

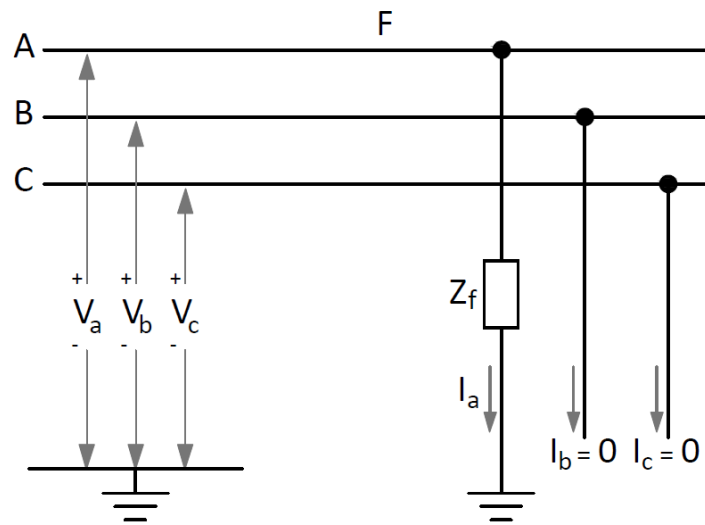


Fuente: Obtenido del texto de Paul M. Anderson (ANDERSON, 1995). Pag. 37

#### 2.3.2.2. Falla monofásica (1 $\phi$ ). Fase – tierra

Para una falla monofásica a tierra desde la fase A, a través de una impedancia  $Z_f$  los segmentos hipotéticos se conectan como se muestra en la siguiente figura siguiente:

**Figura 2.2. Diagrama de falla monofásica**

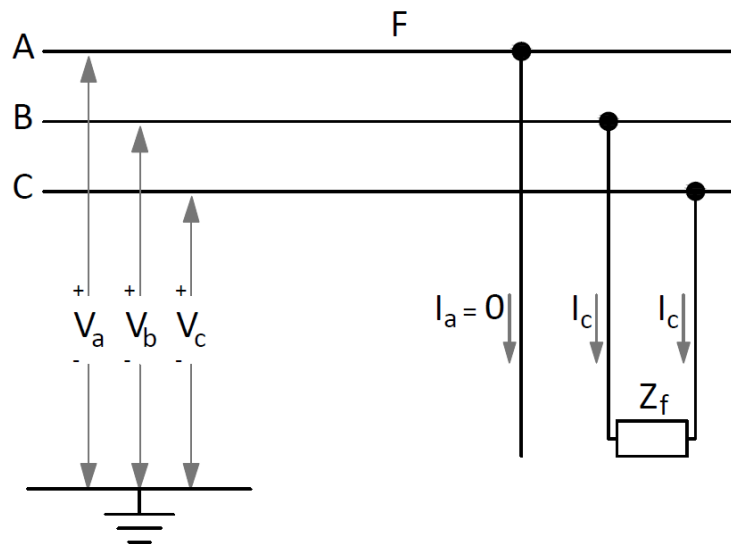


Fuente: Obtenido del texto de Paul M. Anderson (ANDERSON, 1995). Pag. 37

### 2.3.2.3. Falla bifásica ( $2\phi$ ). Fase – fase

Se representa una falla fase-fase (B y C) a través de una impedancia  $Z_f$ , conectando los segmentos hipotéticos de las fases en falla, como se muestra

**Figura 2.3. Diagrama de falla bifásica**

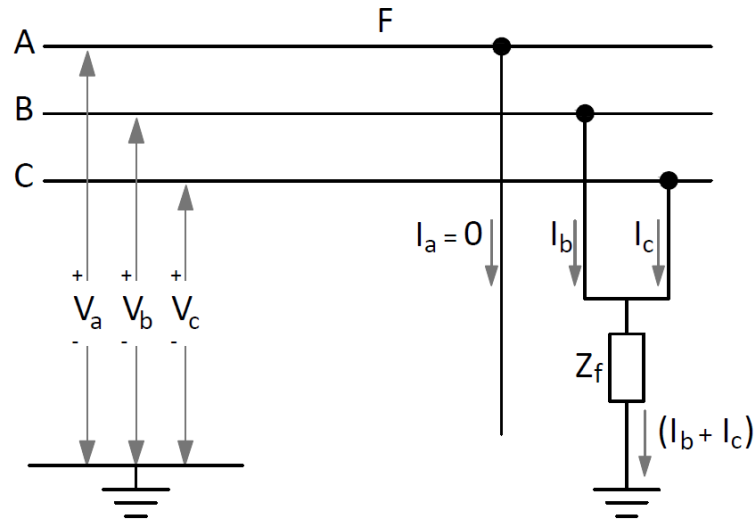


Fuente: Obtenido del texto de Paul M. Anderson (ANDERSON, 1995). Pag. 42

#### 2.3.2.4. Falla bifásica a tierra. Dos fases – tierra

Se representa una falla fase-fase a tierra (en las fases B y C) a través de una impedancia  $Z_f$ , conectando los segmentos hipotéticos de las fases en falla, como se muestra:

**Figura 2.4. Diagrama de conexión de una falla bifásica a tierra**



Fuente: Obtenido del texto de Paul M. Anderson (ANDERSON, 1995). Pag. 45

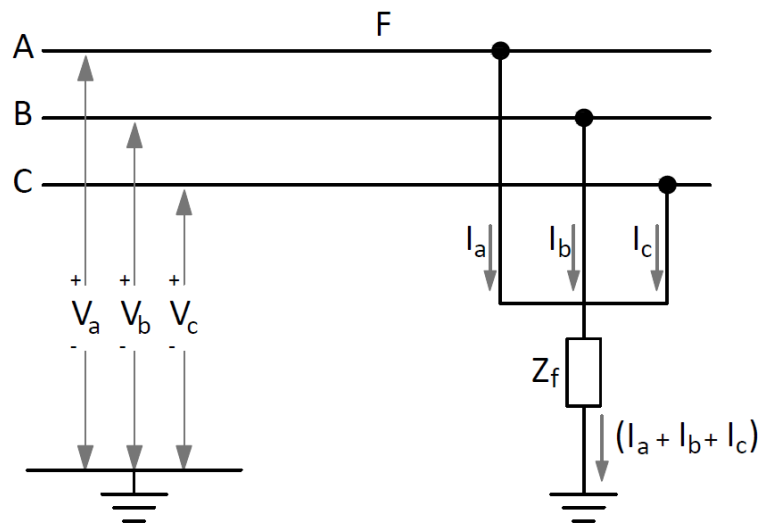
#### 2.3.2.5. Falla trifásica (3 $\phi$ )

Las fallas trifásicas son importantes por varias razones, primero, a menudo es el tipo más severo, y por lo tanto debe ser revisado para verificar que los disyuntores tienen adecuada capacidad de interrupción. Segundo, es la falla más sencilla de determinar analíticamente y por lo tanto es la única calculada, en algunos casos, cuando la completa información del sistema es deficiente. Y, tercero, se asume a menudo que otros tipos de falla, si no se despejó prontamente, se desarrollarán como las fallas trifásicas. Es, por tanto, este tipo de fallas debe ser calculado en adición a otras fallas.

Se representa una trifásica a tierra a través de una impedancia  $Z_f$ , conectando los segmentos hipotéticos como se muestra:



**Figura 2.5. Diagrama de conexión de una falla trifásica**



Fuente: Obtenido del texto de Paul M. Anderson (ANDERSON, 1995). Pag. 49

Las **Fallas en Serie** se refieren a condiciones desequilibradas en las que no existe una conexión directa entre las líneas o entre una fase y el neutro en el punto de la falla. En este tipo de fallas, generalmente se presenta una impedancia desequilibrada en serie. A diferencia de las fallas shunt, no hay un único "punto de falla", sino que existen dos puntos de falla, uno en cada extremo de la impedancia desequilibrada en la línea. (ANDERSON, 1995, pág. 53)

Las **Fallas Simultaneas** se producen cuando ocurren dos tipos de fallas al mismo tiempo, combinando fallas en serie y shunt, en dos o más puntos remotos (generalmente se considera solo dos). La probabilidad de que este tipo de falla ocurra en un solo evento es bastante baja. (ANDERSON, 1995, pág. 308).

#### **2.3.2.6. Ocurrencia de tipos de falla**

La bibliografía disponible sobre fallas indica que las más comunes son las fallas monofásicas, seguidas por las bifásicas, y las trifásicas son las menos frecuentes. El siguiente cuadro presenta la frecuencia promedio con la que ocurren estos tipos de fallas.

**Tabla 2.1. Tasa de fallas de acuerdo con el tipo (1 $\phi$ , 2 $\phi$  ó 3 $\phi$  )**

| <b>TIPOS DE FALLAS</b>   | <b>FRECUENCIA (%)</b> |
|--------------------------|-----------------------|
| <b>Trifásico</b>         | 5                     |
| <b>Bifásico a tierra</b> | 10                    |
| <b>Bifásico</b>          | 15                    |
| <b>Monofásico</b>        | 70                    |

Fuente: Obtenido del Westinghouse Electric Corporation (Corporation, 1964, pág. 358)

#### **2.3.2.7. Ocurrencia de fallas en el sector del sistema eléctrico**

En el siguiente cuadro, se presenta una visión general de la contribución de falla del sistema eléctrico, basada en las características específicas de cada sector, como las plantas de generación, subestaciones y líneas de transmisión.

**Tabla 2.2. Taza de ocurrencia de falla en un sistema eléctrico**

| <b>Sector del sistema eléctrico</b> | <b>FALLAS</b> |
|-------------------------------------|---------------|
| <b>Generación</b>                   | 6 %           |
| <b>Subestación</b>                  | 5 %           |
| <b>Líneas de transmisión</b>        | 89 %          |

Fuente: Obtenido del libro de Geraldo Kindermann - Cortocircuito pag.153 (Geraldo KINDERMAN, 2010)

El sector más susceptible a fallas es el de transmisión, ya que, debido a su naturaleza, cubre grandes distancias atravesando áreas muy variadas, con diferentes tipos de terreno y condiciones climáticas

#### **2.3.3. ANÁLISIS CON SOFTWARE POWERFACTORY DIgSILENT**

PowerFactory DIgSILENT es un software de cálculo utilizado en ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia, que incluye redes de transmisión, distribución e industriales. Este software ha sido desarrollado como un paquete avanzado, interactivo e integrado, diseñado para el análisis de sistemas y el control de la energía eléctrica, con el objetivo de optimizar la planificación y operación de los sistemas eléctricos. (DIgSILENT GmbH, 2014)

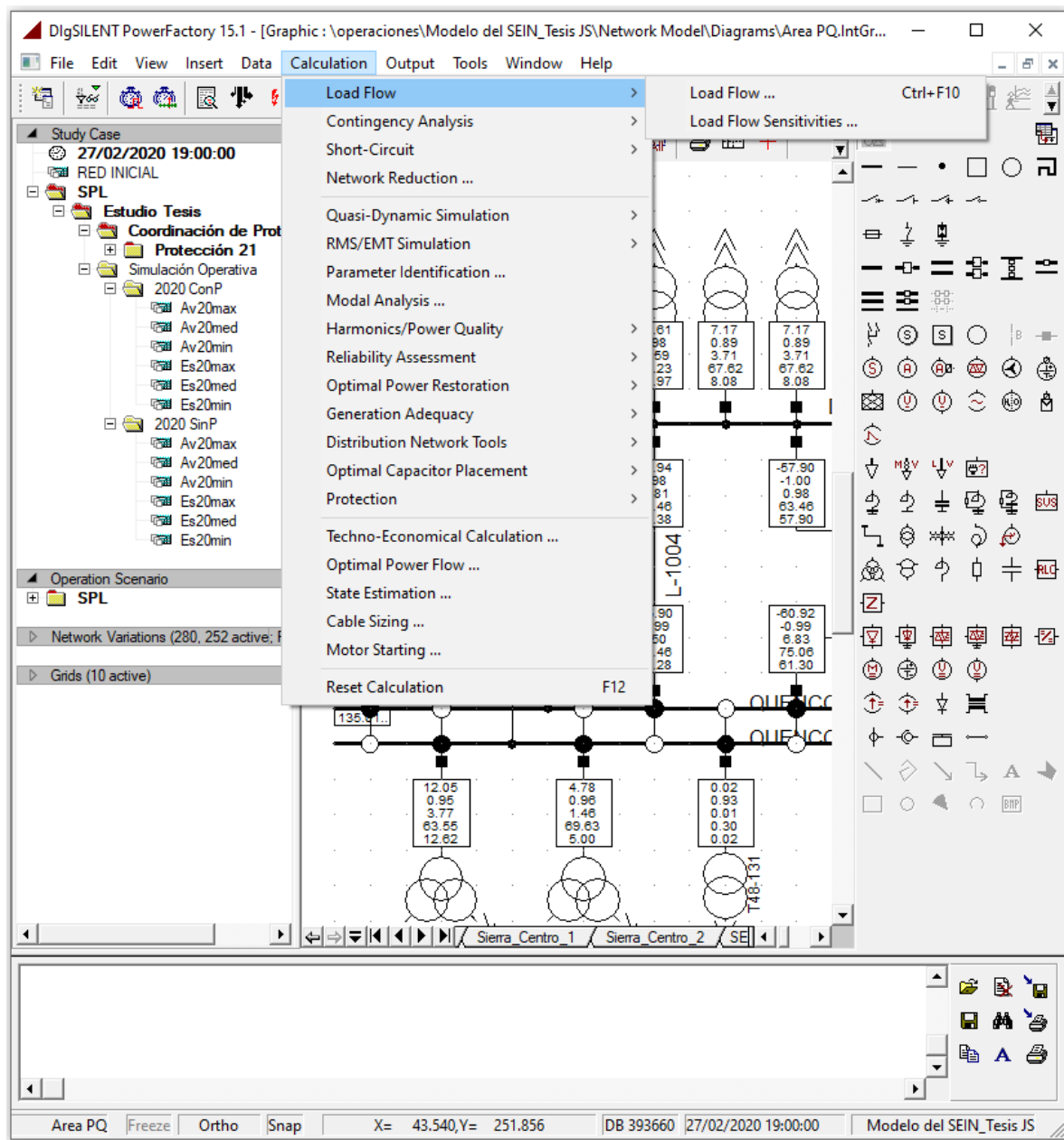
El software ofrece diversas funciones para cálculos y simulaciones. En la Figura 2.6 se presenta la interfaz de usuario y las diferentes funcionalidades disponibles en la versión

15.1.7 de DIgSILENT. Para el propósito de este estudio, se utilizarán los módulos de **Load Flow** (flujo de carga), **Short-Circuit** (cortocircuito) y **Protection** (protección)

#### **2.3.3.1. Flujo de carga con Power Factory DIgSILENT**

La opción **Load Flow** (flujo de carga) dispone de dos métodos principales: el Método de Flujo de Carga en Corriente Alterna (AC Load Flow Method), que puede ejecutarse en dos modalidades: balanceado para secuencia positiva o desbalanceado (trifásico ABC). Este método utiliza la formulación matemática de Newton-Raphson. El otro método disponible es el Método de Flujo de Carga en Corriente Directa (DC Load Flow Method), que se utiliza para realizar análisis rápidos en redes de transmisión complejas, donde solo se requiere una aproximación razonable del flujo de carga. Este método también se emplea en situaciones donde el flujo de carga en AC presenta problemas de convergencia. (DIgSILENT GmbH, 2014, pág. 414).

**Figura 2.6. Entorno del software DlgSILENT 15.1.7 y funciones disponibles**



Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3.2. Cortocircuito con Power Factory DlgSILENT

La opción **Short-Circuit** (cortocircuito) ofrece varios métodos de cálculo, entre ellos: IEC 61363, ANSI, IEC 60909, VDE 0102, IEC 61660 (DC), ANSI/IEEE 946 (DC) y el Método Completo (Complete Method), también conocido como el método de superposición.

Para una comprensión más detallada de los métodos, el lector puede consultar el Manual del Usuario de DlgSILENT (DlgSILENT GmbH, 2014).

El **Método Completo** es un cálculo preciso basado en la norma IEC 60909/VDE 0102. Este método determina las corrientes de falla por cortocircuito superponiendo una condición de flujo de carga normal del sistema eléctrico antes del inicio de la falla con una condición en la que todas las fuentes de tensión se establecen en cero y la tensión de operación negativa se conecta en el punto de falla.

El estado inicial o condición normal del sistema es la situación del sistema antes del cortocircuito. A partir de esta condición pre-falla, se puede calcular la tensión en el punto de falla. Para la condición de falla pura, se calcula el estado del sistema cuando la tensión de barra negativa, previa a la falla, se conecta en el punto de la falla, y todas las demás fuentes de tensión se establecen en cero. Dado que se supone que las impedancias de la red son lineales, el estado del sistema después de la falla se determina al sumar las condiciones pre-falla y de falla pura. Para más detalles, ver el Manual del Usuario del software (DIgSILENT GmbH, 2014, págs. 453, 459,460).

En el Capítulo 22 del manual del usuario de DIgSILENT, se proporciona información sobre el análisis de cortocircuito, incluyendo detalles como:

- Métodos de análisis de cortocircuito: IEC, ANSI, IEEE, Superposición (completo)
- Ejecución de cálculos de cortocircuito: Herramientas, menús de ejecución, fallas en las líneas, barras, etc.
- Opciones de cálculo de cortocircuito
- Muestra de resultados

**Parámetros Determinados en un Análisis de Cortocircuito.** El análisis de cortocircuito proporciona los siguientes parámetros esenciales para el diseño y operación de sistemas eléctricos (Blackburn & Domin, 2007):

- Corriente de cortocircuito inicial ( $I_k$ ): Valor de corriente en el instante inmediato posterior a la falla.
- Corriente de cortocircuito simétrica ( $I_k''$ ): Valor RMS de la corriente durante el estado transitorio inicial.
- Potencia de cortocircuito ( $S_k$ ): Potencia aparente asociada a la corriente de falla en un punto dado.
- Corriente de cortocircuito asimétrica: Incluye la componente continua que puede causar mayores esfuerzos mecánicos en equipos.

## **2.4. SISTEMAS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA**

### **2.4.1. SISTEMA DE PROTECCIÓN**

Se define: **Sistema de protección** como una combinación de equipos de protección diseñado para asegurar, en condiciones predeterminadas, por lo general anormales, la desconexión de un elemento de un sistema de energía o para dar una señal de alarma o, ambos (GRID ALSTOM, 2011).

El COES define como: “Sistema de supervisión de las magnitudes eléctricas que permite detectar las fallas en los equipos y/o instalaciones del sistema, las condiciones anormales de operación del sistema y el estado inapropiado de los equipos con la finalidad de tomar las acciones correctivas de manera inmediata” (COES SINAC, Julio 2018).

Independientemente del punto en que se produzca la falla, la primera reacción del sistema de protección es la de desconectar el circuito en falla, para impedir que la falla se propague y disminuir el tiempo de permanencia bajo solicitaciones extremas de los equipos más directamente afectados.

#### **Componentes de los Sistemas de Protección**

Con base en los requisitos mínimos establecidos para los sistemas de protección en el SEIN, el Sistema de Protección está integrado por un conjunto de protecciones que abarcan distintas zonas del sistema eléctrico.

- Relés de Protección
- Interruptores de Potencia
- Transformadores de Tensión
- Transformadores de Corriente
- Enlaces de Comunicación entre los Relés de distintas estaciones
- Fuentes de Alimentación de los circuitos de protección
- Cableado de Control

Estos componentes operan de manera conjunta, por lo que el mal funcionamiento de uno de ellos puede ocasionar una falla general en el desempeño del Sistema de Protección en su totalidad.

El diseño del sistema de protección debe considerar la capacidad de responder ante una doble contingencia, es decir, debe prever un escenario donde ocurra una falla en el sistema eléctrico

seguida de un fallo en el conjunto Relé-Interruptor que compone el sistema de protección. Por esta razón, es necesario definir las siguientes etapas o niveles:

- 1) **Protección principal.** Constituye la primera línea de defensa en una zona de protección y deben tener una actuación lo más rápida posible (instantánea) (COES SINAC, 2018, págs. 12 - Requisitos).
- 2) **Protección de respaldo.** Constituyen la segunda instancia de actuación de la protección y deberán tener un retraso en el tiempo, de manera de permitir la actuación de la protección principal en primera instancia (COES SINAC, 2018, pág. 12. Requisitos).

#### 2.4.2. OBJETIVOS DEL SISTEMA PROTECCIONES ELÉCTRICAS

De acuerdo con el texto de Samuel Ramírez (RAMIREZ CASTANO, 2003) son:

- Proteger efectivamente a las personas y los equipos.
- Reducir la influencia de las fallas sobre las líneas y los equipos.
- Cubrir de manera ininterrumpida el Sistema de Potencia (SP), estableciendo vigilancia el 100% del tiempo.
- Detectar condiciones de falla monitoreando continuamente las variables del SP (I, V, P, f, Z).

El COES, por su parte, establece como objetivos del sistema de protección no solo la seguridad de las personas, sino también la capacidad de identificar, notificar y desconectar los equipos ante fallas, condiciones no deseadas o anómalas que puedan surgir en el sistema eléctrico. Esto contrasta con la visión de Ramírez Castaño, quien se centra en la protección efectiva de las personas.

#### 2.4.3. AJUSTES DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS

De acuerdo con el texto publicado por el COES: “Ajustar la protección significa definir los límites o umbrales de su característica de operación para detectar las fallas, las condiciones anormales del sistema y las condiciones indeseadas de los equipos. Es decir, ajustar la protección es definir los umbrales de las señales de entrada (o de un algoritmo de ellas), los cuales determinarán la operación de la protección” (COES SINAC, Julio 2018)

Además, el texto menciona que “El ajuste de la protección está determinado por la capacidad y el comportamiento de los equipos e instalaciones del sistema eléctrico, en todas las condiciones de operación, ya sean temporales como permanentes”.

#### **2.4.4. COORDINACIÓN DE PROTECCION**

En los criterios de ajuste y coordinación publicado por el COES, indica que “Coordinar la protección significa definir los tiempos de operación de la protección para permitir la actuación debidamente priorizada de los relés de protección, minimizando los tiempos de actuación y garantizando una apropiada graduación en los tiempos de actuación de todas las protecciones, tanto las principales como las de respaldo”.

Además, “La coordinación de la protección está determinada por la necesaria graduación de tiempos y magnitudes medidas para la correcta y oportuna actuación de todas las protecciones” (COES SINAC, Julio 2018)

#### **2.5. AJUSTE Y LA COORDINACIÓN DE LA PROTECCIÓN DE LAS SUBESTACIONES.**

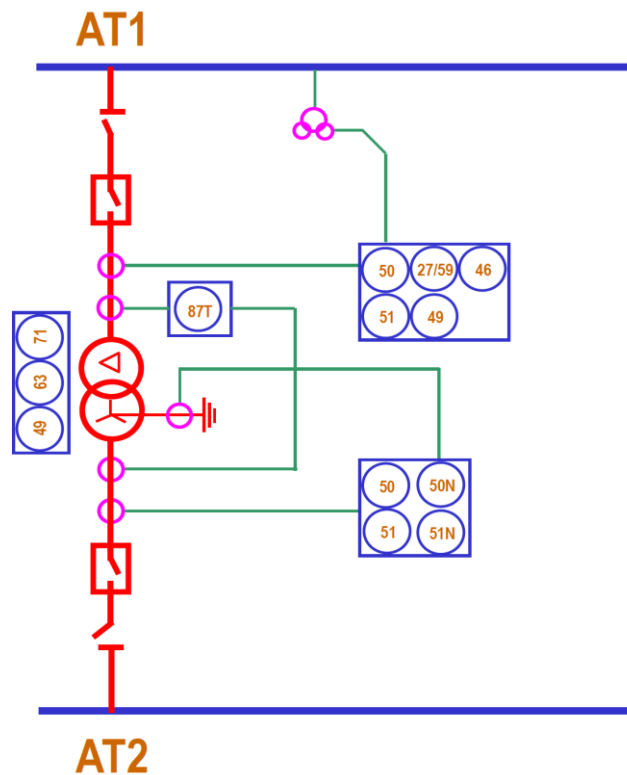
De acuerdo con el COES, la protección de los transformadores de potencia es definida según la potencia de estos equipos (COES SINAC, Julio 2018) y se clasifican en:

- **Pequeños**            Potencia mayor o igual a 1 MVA y menor que 5 MVA
- **Medianos**           Potencia mayor o igual a 5 MVA y menor que 50 MVA
- **Grandes**            Potencia mayor o igual a 50 MVA

En el **Figura 2.7** se muestra las protecciones mínimas que deben ser consideradas para los transformadores pequeños. Se ha considerado como esquema general una subestación radial con un único transformador de dos devanados (COES SINAC, Julio 2018).



**Figura 2.7. Protecciones mínimas que considerar para transformadores pequeños**



Fuente: (COES SINAC, Julio 2018, pág. 54)

Donde:

- 27 Protección de Mínima Tensión
- 46 Protección de Corriente de Secuencia Negativa
- 49 Protección Térmica
- 50 Protección de Sobrecorriente instantánea de fases
- 50N Protección de Sobrecorriente instantánea a tierra
- 51 Protección de Sobrecorriente temporizada de fases
- 51N Protección de Sobrecorriente a tierra
- 59 Protección de Sobretensión
- 63 Protección de Flujo y Sobrepresión (Buchholz)
- 67 Protección de Sobrecorriente direccional de fases
- 67N Protección de Sobrecorriente direccional a tierra
- 71 Protección de Nivel de Aceite
- 87T Protección de Diferencial del Transformador

## **2.5.1. PRINCIPIOS GENERALES: COORDINACIÓN DE LA PROTECCIÓN**

### **2.5.1.1. Sensibilidad y velocidad (COES SINAC, 2018)**

La **sensibilidad** se define como la habilidad para identificar incluso las fallas más pequeñas o incipientes. En el caso de una protección unitaria, que abarca únicamente una zona específica, la sensibilidad debe ser suficiente para diferenciar entre las condiciones normales

de operación y una falla. Por otro lado, en las protecciones graduadas que cubren múltiples zonas, la sensibilidad debe ser capaz de detectar fallas con la corriente mínima de falla, generalmente asociada a condiciones de mínima generación en los extremos de las zonas adyacentes a la protegida.

La **velocidad** se refiere a la habilidad del sistema de protección para responder en el menor tiempo posible. Una respuesta rápida es esencial para reducir al máximo los daños ocasionados por la falla.

#### **2.5.1.2. Selectividad de la protección (COES SINAC, 2018)**

La **selectividad** se define como la capacidad del sistema de protección para identificar fallas dentro de su zona específica. Para lograrlo, es fundamental ajustar correctamente el sistema para cubrir todas las fallas en su área de protección, asegurando además que su actuación esté adecuadamente coordinada con otros dispositivos de protección.

#### **2.5.1.3. Fiabilidad y seguridad de la protección**

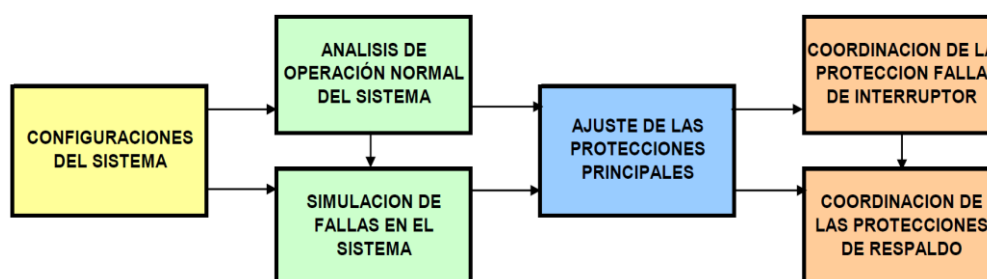
La **fiabilidad** se refiere a la capacidad del sistema de protección para operar correctamente cuando sea necesario, incluso en presencia de tensiones y corrientes transitorias que podrían afectar su capacidad para identificar la falla (COES SINAC, 2018). Por otro lado, la **seguridad** es la capacidad del sistema de evitar una acción innecesaria, asegurando que, a pesar de las tensiones y corrientes transitorias generadas por una falla, no se cometan errores al discriminar si la falla ocurre dentro de la zona de protección (COES SINAC, 2018).

#### **2.5.2. Proceso de ajuste y coordinación de la protección**

La Figura 2.8 ilustra de manera simplificada el proceso de coordinación de protecciones. Para realizar los ajustes necesarios, primero es fundamental establecer la configuración del sistema eléctrico y analizar sus condiciones de operación. Este análisis incluye tanto el estudio de las operaciones normales del sistema como la simulación de fallas, que define el umbral de no actuación de las protecciones. Con base en estas condiciones, se determinan los ajustes de las protecciones principales.

Posteriormente, los ajustes obtenidos deben ser verificados para garantizar una coordinación adecuada como protecciones de respaldo. Esto implica que las protecciones unitarias, al estar limitadas a una sola zona de protección, no requieren coordinación adicional. Sin embargo, las protecciones graduadas deben ajustarse cuidadosamente para garantizar su funcionamiento como respaldo en las zonas de protección adyacentes (COES SINAC, 2018, pág. 8. Criterios)

**Figura 2.8. Proceso de ajuste y coordinación de protección**



Fuente: Criterios de ajuste y coordinación de protecciones del SEIN (COES SINAC, 2018)

### 2.5.3. CRITERIOS DE AJUSTES PARA SUBESTACIONES PEQUEÑAS

**Tabla 2.3. Protecciones graduadas en subestaciones pequeñas**

| Relé de Protección                                           | Mirando fallas hacia la subestación                    | Mirando fallas hacia el sistema interconectado |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 50/51<br>Ubicado en el lado AT del transformador             | En el transformador<br>En barras de baja tensión       |                                                |
| 50N/51N<br>Ubicado en el lado AT del transformador principal | En el transformador<br>En barras de baja tensión       | ( <sup>2</sup> )                               |
| 51/67<br>Ubicado en el lado BT del transformador             | En barras de baja tensión<br>En líneas de salida de BT | En el transformador ( <sup>3</sup> )           |
| 51N/67N<br>Ubicado en el lado BT del transformador principal | En barras de baja tensión<br>En líneas de salida de BT | En el transformador                            |

Fuente: Elaborado en base a: (COES SINAC, Julio 2018)

**Tabla 2.4. Ajuste de protecciones graduadas en subestaciones pequeñas**

| Relé de Protección                               | Por la instalación                                                            | Por la mínima generación                            |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 50/51<br>Ubicado en el lado AT del transformador | 130% de la corriente nominal del transformador (mayor etapa de refrigeración) | Para detectar fallas en barras BT de la subestación |

<sup>2</sup> Si el transformador es estrella con el neutro a tierra, esta protección será sensible a fallas en las líneas de llegada de alta tensión.

<sup>3</sup> El relé direccional es sensible a fallas en el transformador cuando la falla se alimenta a través del transformador no fallado.

|                                                   |                                                                               |                                                                 |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 50N/51N                                           |                                                                               |                                                                 |
| Ubicado en el lado AT del transformador principal | 20% a 40% de la corriente nominal del transformador                           |                                                                 |
| 51/67                                             |                                                                               |                                                                 |
| Ubicado en el lado BT del transformador           | 130% de la corriente nominal del transformador (mayor etapa de refrigeración) | Para detectar las fallas al final de las líneas de salida de BT |
| 51N/67N                                           |                                                                               |                                                                 |
| Ubicado en el lado BT del transformador principal | 20% de la corriente nominal del transformador                                 |                                                                 |

Fuente: Elaborado en base a: (COES SINAC, Julio 2018)

#### **2.5.4. CRITERIOS DE COORDINACION DE PROTECCIONES**

##### **2.5.4.1. Para fallas en bornes de AT del transformador**

La protección del lado de AT del transformador medirá las corrientes de falla que provienen del sistema y debe actuar en un tiempo máximo de 250 ms.

##### **2.5.4.2. Para fallas en bornes de BT del transformador**

La protección del lado AT del transformador (51) verá como una falla en barras de BT y debe actuar en un tiempo máximo de 750 ms. Este tiempo es mayor que 500 ms porque se requiere coordinación con la protección del lado de BT del transformador.

La protección del lado BT del transformador verá una falla con una corriente en la dirección contraria al flujo de potencia normal. Por tal motivo, el elemento de protección direccional (67) protegerá este evento con un tiempo máximo de 250 ms.

##### **2.5.4.3. Para fallas en barras de BT de la subestación**

Las protecciones del lado de BT de los transformadores (51) verán la falla y deben actuar en un tiempo máximo de 500 ms.

Las protecciones del lado de AT de los transformadores (51) medirán las corrientes de falla que provienen del sistema y deben actuar en un tiempo aproximado de 750 ms. Este tiempo es mayor que 500 ms porque se requiere coordinación con la protección del lado de BT del transformador.

##### **2.5.4.4. Para fallas en las líneas de salida de BT**

Las protecciones de las líneas de salidas de BT deberán proteger los circuitos con elementos instantáneos (50) y temporizados (51), debiendo eliminar las fallas cercanas a la subestación en un tiempo máximo de 250 ms.

Las protecciones del lado de BT de los transformadores (51) verán la falla y deben actuar en un tiempo máximo de 500 ms.

La protección del lado AT del transformador (51) verá como una falla en barras de BT y debe actuar en un tiempo máximo de 750 ms.

#### **2.5.5. PROCEDIMIENTOS PARA DEFINIR LOS AJUSTES DE PROTECCIÓN**

El estudio de coordinación de los sistemas de protección implica una serie de procedimientos sistemáticos que permiten evaluar y optimizar los ajustes de los equipos, garantizando una operación segura y confiable del sistema eléctrico. Este proceso abarca desde la recopilación de datos hasta la evaluación de los ajustes propuestos. La metodología para seguir incluye los siguientes pasos:

##### **2.5.5.1. Recopilación de Datos**

Se recolecta toda la información necesaria del sistema eléctrico, incluyendo características técnicas de los equipos (transformadores, relés, líneas de transmisión), diagramas unifilares, y datos históricos de operación y mantenimiento.

##### **2.5.5.2. Modelamiento de la Red Eléctrica**

Se construye un modelo detallado de la red utilizando software especializado, como Power Factory DlgSILENT, para representar con precisión las condiciones operativas del sistema y sus componentes. Este modelado permitirá realizar simulaciones y análisis posteriores con un alto grado de exactitud.

##### **2.5.5.3. Creación de Base de Datos de Ajustes de Equipos de Protección**

Se elabora una base de datos que contiene los parámetros y ajustes actuales de los equipos de protección, lo que sirve como referencia para los cálculos de ajuste y futuras modificaciones.

##### **2.5.5.4. Análisis de Flujo de Carga**

Se lleva a cabo un análisis del flujo de potencia en el sistema, considerando escenarios de máxima y mínima demanda. Esto permite evaluar la distribución de tensiones y corrientes en las distintas partes de la red y detectar posibles sobrecargas o puntos de baja tensión.

##### **2.5.5.5. Análisis de Cortocircuitos**

Se realizan cálculos para determinar los niveles de corriente de cortocircuito en distintos puntos del sistema. Estos valores son esenciales para el diseño de los ajustes de protección, ya que los equipos deben ser capaces de detectar y actuar ante fallas con rapidez y precisión.

#### **2.5.5.6. Cálculos de Ajustes de los Sistemas de Protección**

A partir de los resultados de los estudios de flujo de carga y cortocircuito, se determinan los parámetros óptimos de ajuste para los equipos de protección, tales como tiempos de actuación, niveles de corriente de disparo y selectividad.

#### **2.5.5.7. Evaluación y Validación de los Ajustes Propuestos**

Finalmente, se revisan y validan los ajustes calculados mediante simulaciones y pruebas virtuales en el modelo de la red. Esto asegura que los ajustes propuestos cumplen con los criterios de coordinación, selectividad y seguridad requeridos por el sistema.

### **2.6. SIMULACIÓN DE FALLAS**

#### **2.6.1. ESCENARIOS PARA SIMULACIÓN DE FALLAS**

Se debe definir los escenarios que corresponden a las mínimas y máximas corrientes de fallas, las cuales corresponden a los siguientes casos:

##### **2.6.1.1. Máxima corriente de falla**

Con máxima demanda en estiaje o avenida, lo que ocasione el mayor nivel de cortocircuito en barras de alta tensión de la subestación. Se hará uso del Método de Superposición y/o el Método Completo de acuerdo con el Software Power Factor DIgSILENT.

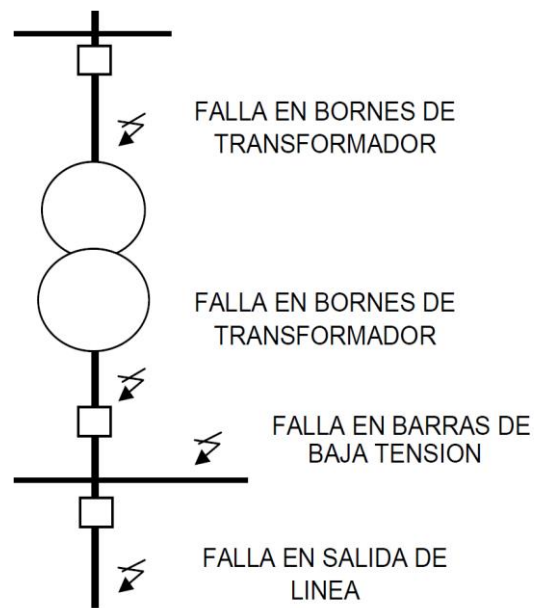
##### **2.6.1.2. Mínima corriente de falla**

Con mínima demanda en estiaje o avenida, lo que ocasione el menor nivel de cortocircuito en barras de alta tensión de la subestación. Para las funciones de protección de fases debe calcularse las fallas bifásicas y para las funciones de protecciones de tierra las fallas monofásicas con resistencia de falla diferente de cero.

#### **2.6.2. SIMULACIÓN DE FALLAS EN SUBESTACIONES**

De acuerdo con los Criterios de Ajuste y Coordinación del COES: “Se debe simular las fallas en las barras de alta y baja tensión de la subestación. Estas fallas deben ser analizadas en cada circuito conectado a estas barras. Una manera práctica es considerar las fallas en el 1% de la impedancia del circuito conectado”.

**Figura 2.9. Simulación de fallas en subestación pequeña**



Fuente: Elaborado en base a: (COES SINAC, Julio 2018)

### **2.6.3. SIMULACIÓN DE FALLAS EN LINEAS**

Las simulaciones de fallas serán de los siguientes tipos:

- Fallas monofásicas a tierra sin resistencia de falla
- Fallas trifásicas sin resistencia de falla

Se debe simular fallas por lo menos al 1% y al 99 %

## **CAPÍTULO 3.**

### **EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ACTUAL**

---

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El capítulo presente tiene la finalidad de desarrollar el objetivo específico 1, es decir: comprende la descripción, análisis y evaluación del sistema eléctrico y su coordinación de protección actual.

Se inicia con la descripción del sistema eléctrico en estudio para de tener conocimiento de la topología de la red eléctrica. Seguidamente, se realiza la descripción del sistema de protección actual, que son los ajustes y equipos de protección. Con la información descrita se realiza el análisis de flujo de carga y análisis de falla.

La información contenida en el capítulo está basada en la recopilación documental, brindados por la empresa concesionaria. Se finaliza con la evaluación del sistema de protección actual.

#### **3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL**

Un panorama general es describir el sistema eléctrico de la S.E. Pisac, desde donde se suministra energía a la subestación de Paucartambo y Salvación, que son las subestaciones actuales.

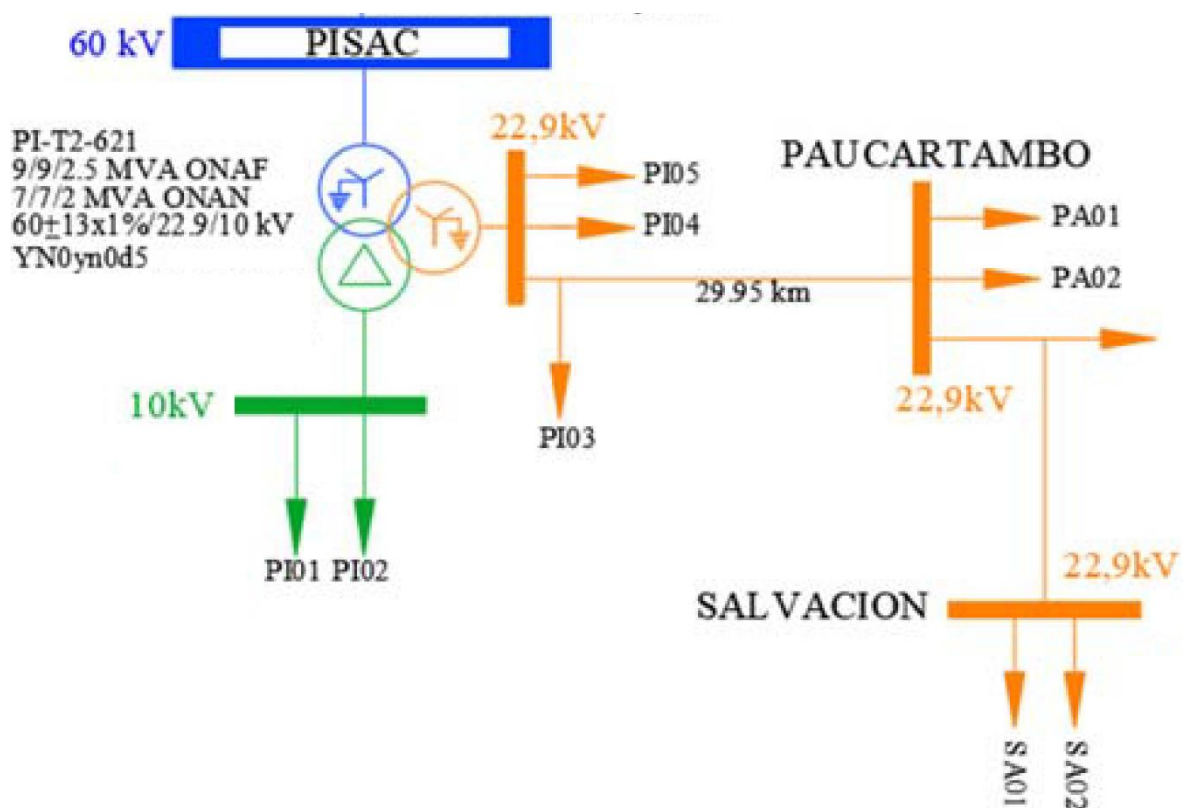
La S.E. Pisac se tiene el transformador de potencia de 3 devanados: 60/22.9/10 kV a 7/7/2 MVA ONAN y 9/9/2.5 MVA ONAF. Por el nivel de 60 kV se suministra energía desde la S.E. Cachimayo a través de una línea de transmisión en 60 kV, que no corresponde a la parte del estudio. En el nivel de 22.9 kV se tiene tres alimentadores de media tensión, denominados PI03, PI04 y PI05, para suministro de energía a usuarios regulados de ELSE. En el nivel de 10 kV se tiene dos alimentadores de media tensión denominada PI01 y PI02, también para suministro de energía a usuarios de la zona de concesión de ELSE.



Desde el alimentador PI03 en 22.9 kV, se suministra energía hasta la S.E. Paucartambo, donde no se tiene ningún transformador de potencia, mas es una subestación de maniobra mas no de transformación.

En S.E. Paucartambo, se tiene actualmente tres alimentadores de media tensión PA01, PA02 y PA03, en 22.9 kV. De la salida PA03, se suministra energía a través de una línea también en 22.9 kV hasta la S.E. Salvación, esta última, no es de transformación, sino es de maniobra, donde se tiene equipos de protección como Recloser para las salidas SA01 y SA02.

**Figura 3.1. Red eléctrica actual. S.E. Pisac, S.E. Paucartambo y S.E. Salvación**



Fuente: Elaborado en base a la información brindada por ELSE

De SET Pisac AMT PI03

22.9 kV

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

IN605  
16KA  
800A  
72.5KV

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

22.9kV

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

PR-23

IN-23  
800A  
170KV BIL

GE/F6501

RE1PA01

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

PR-23

PA-01

IN-23  
800A  
170KV BIL

GE/F6501

RE1PA02

SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

PR-23

PA-02

IN-23  
800A  
170KV BIL

GE/F6501

RE1PA03

PR-23

P2

TC-200  
75-150/1A  
CL0.2

P1

TC-BUSHING  
150-90/5A,-,30VA,-,5P20  
150-90/5A,-,30VA,-,5P20  
150-90/5A,-,30VA,-,CL0.5

PA-T35-032  
33(+5)(-6)X2.5%/22.9kV  
5-6.5MVA/ONAN-ONAF  
YNYNO  
2.1%

TC-BUSHING  
200-125/5A,-,30VA,-,5P20  
200-125/5A,-,30VA,-,5P20  
200-125/5A,-,30VA,-,CL0.5

P2

P1

TC-233.1  
150-300-450-600/5A,-,30VA,-,5P20  
150-300-450-600/5A,-,30VA,-,CL0.5

P2

P1

1IN1047  
25KA  
1250A  
24KV

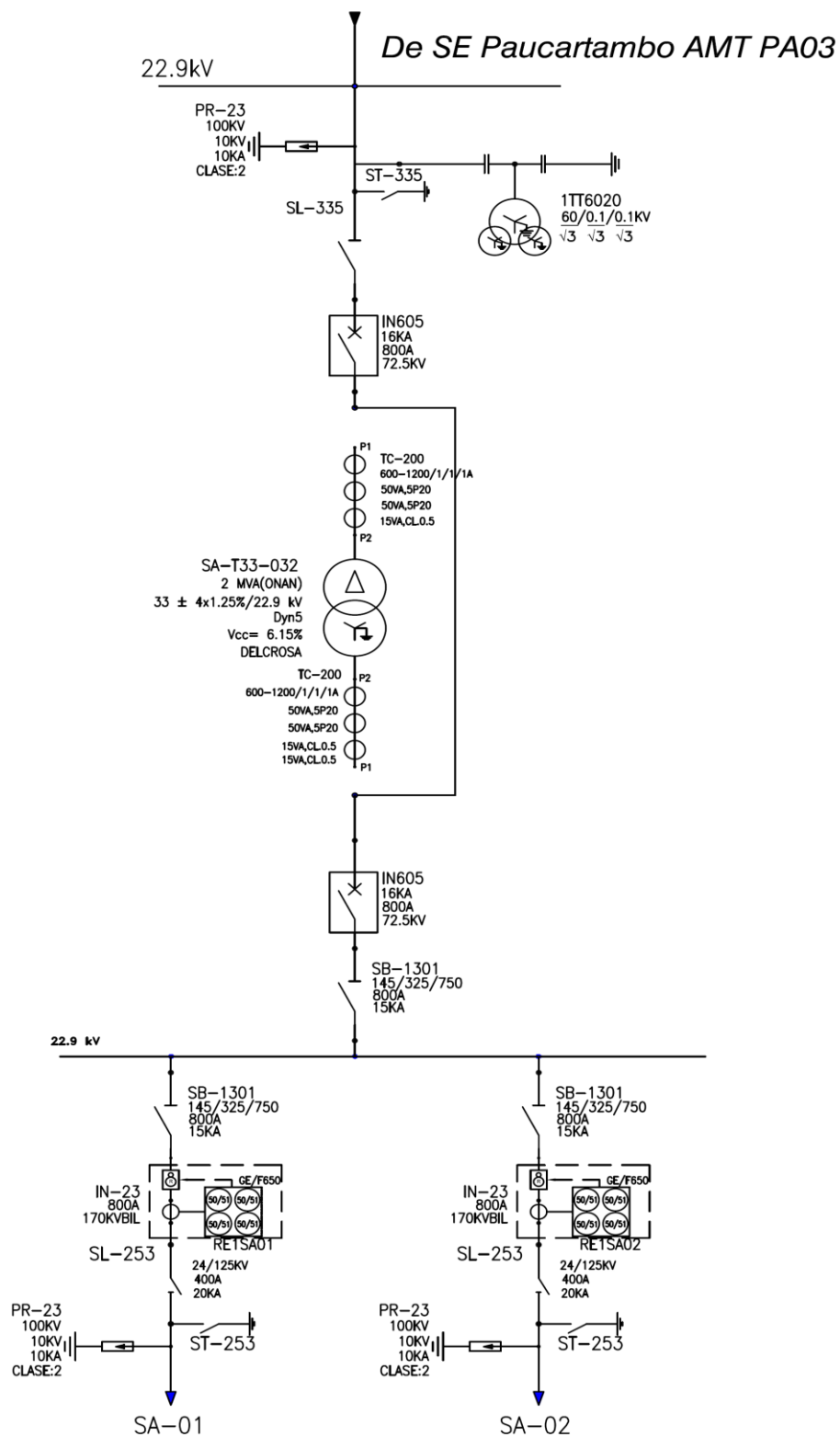
SB-1301  
800A  
15KA  
145/325/750

PA-03

1TT6020  
60/0.1/0.1KV  
√3 √3 √3  
50VA,CL0.2  
50VA,3P

48

Figura 3.3. Diagrama Unifilar S.E. Salvación – Actual



Fuente: Información brindada por ELSE

### 3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO

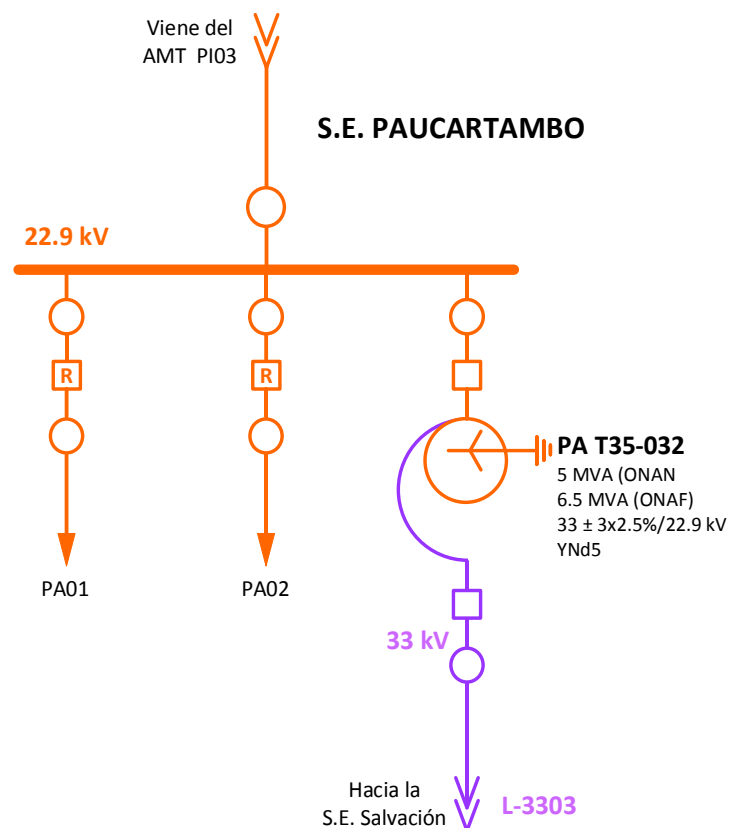
#### 3.3.1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PAUCARTAMBO

La Subestación Eléctrica (S.E.) Paucartambo ubicado en el distrito y provincia del mismo nombre, de la Región Cusco, es alimentada del SEIN a través de la red de 22.9 kV desde la S.E. Pisac, que viene a ser parte del Alimentador de Media Tensión (AMT) Pisac 03 (PI03).

En la S.E. Paucartambo existe una barra en 22.9 kV, donde se conectan las siguientes redes y/o elementos conectados:

1. Línea de llegada desde la S.E. Pisac (Fuente de suministro)
2. Alimentador de media tensión PA01
3. Alimentador de media tensión PA02
4. Transformador elevador 33/22.9 kV de 5 MVA

**Figura 3.4. S.E. Paucartambo al 2019**



Fuente: Elaborado en base a datos brindados por ELSE

### 3.3.2. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA SALVACIÓN

La S.E. Salvación, ubicado en el distrito y provincia Manu, del departamento Madre de Dios, es suministrada desde la S.E. Paucartambo a través de la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación. La subestación cuenta con un transformador reductor de 33/22.9 kV de 2 MVA. Desde el nivel de 22.9 kV, se suministra energía a diferentes localidades a través de dos alimentadores, llamemos SA01 y SA02.

**Tabla 3.1. Características técnicas de la S.E. Salvación**

| Parámetro                     | Unidad | Alta Tensión | Baja Tensión      |
|-------------------------------|--------|--------------|-------------------|
| Tensión nominal               | kV     | 33           | 22.9              |
| Frecuencia                    | Hz     | 60           | 60                |
| Potencia del Transformador    | MVA    | 2            | 2                 |
| Conexión neutro transformador | -      | Aislado      | Solido            |
| Tipo de conexión              | -      | Delta        | Estrella aterrada |
| Numero de fases               | -      | 3            | 3                 |
| Tensión máxima de operación   | kV     | 34.5         | 24                |

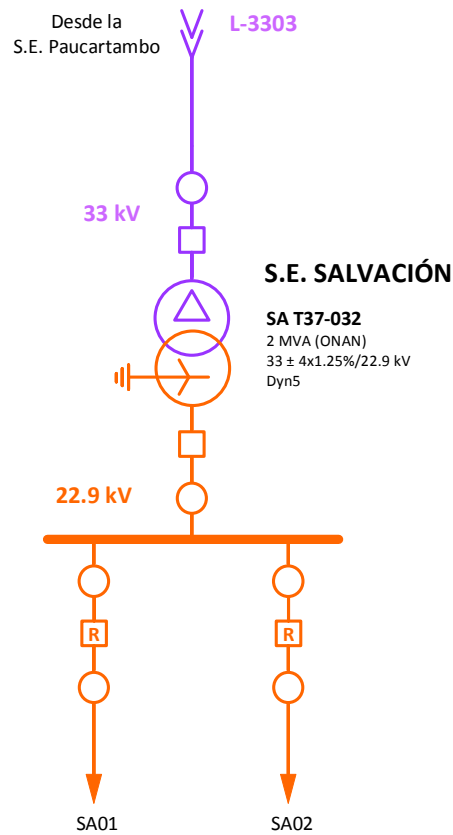
Fuente: Elaborado en base a datos brindados por ELSE

**Tabla 3.2. Localidades suministradas por la S.E. Salvación**

| Ítem | Localidad           | Categoría        | Distrito    | Provincia |
|------|---------------------|------------------|-------------|-----------|
| 1    | Salvación           | Pueblo           | Manu        | Manu      |
| 2    | Itahuania           | Caserío          | Manu        | Manu      |
| 3    | Shintuya            | Comunidad Nativa | Manu        | Manu      |
| 4    | Palotoa Llactapampa | Comunidad Nativa | Manu        | Manu      |
| 5    | Gamita              | Caserio          | Manu        | Manu      |
| 6    | Santa Cruz          | Caserio          | Manu        | Manu      |
| 7    | Mansilla            | Anexo            | Manu        | Manu      |
| 8    | Nueva Mansilla      | Anexo            | Manu        | Manu      |
| 9    | Adán Rayo           | Anexo            | Manu        | Manu      |
| 10   | Los Aguanos         | Anexo            | Manu        | Manu      |
| 11   | Nuevo Edén          | Pueblo           | Fitzcarrald | Manu      |
| 12   | San Isidro          | Anexo            | Manu        | Manu      |
| 13   | Cabo de Hornos      | Anexo            | Manu        | Manu      |

Fuente: Elaborado en base a datos brindados por ELSE

**Figura 3.5. S.E. Salvación al 2019**



Fuente: Elaborado en base a datos brindados por ELSE

### 3.3.3. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PILLCOPATA

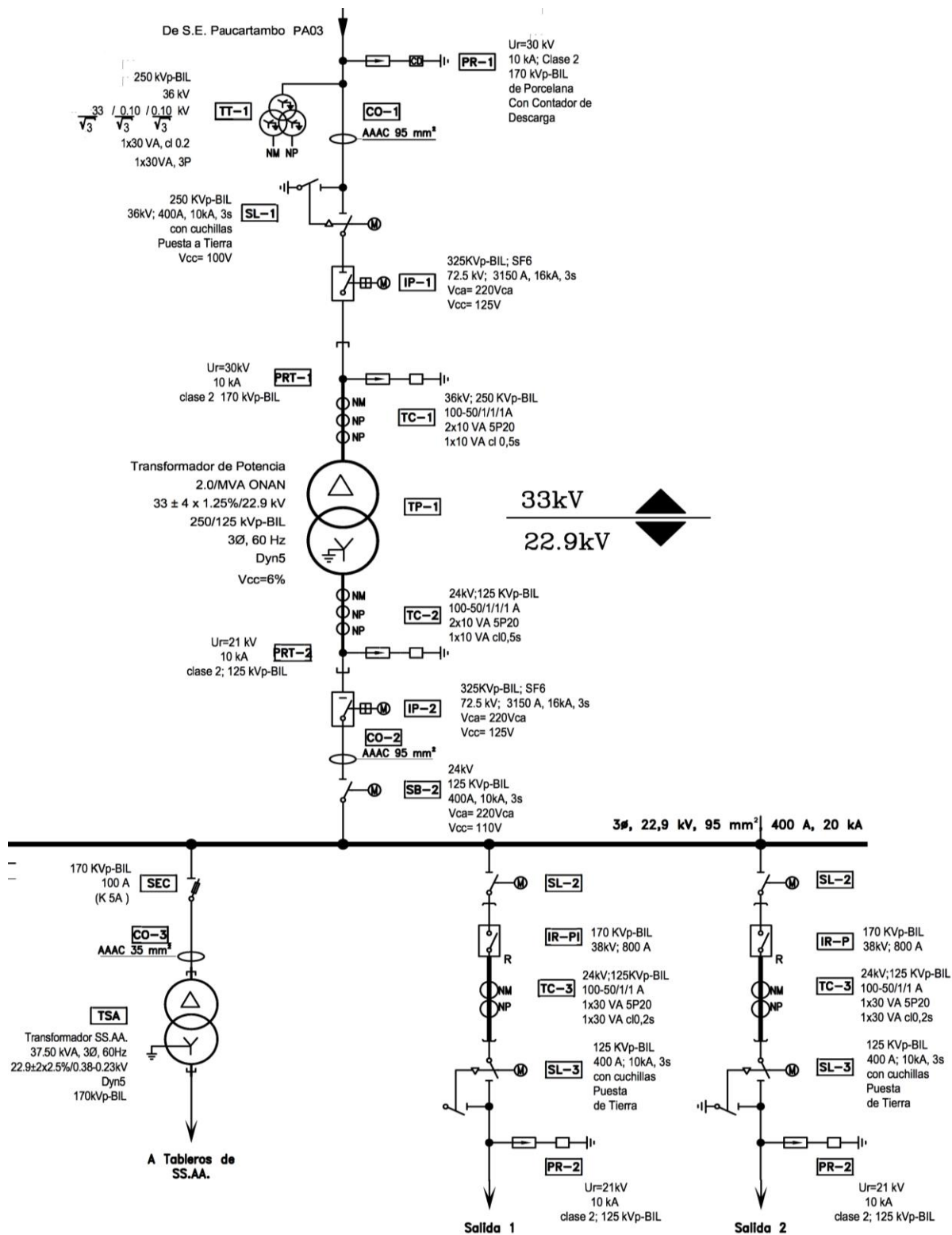
La S.E. Pillcopata, actualmente se encuentra en etapa de construcción, se ubica en el distrito de Kosñipata, provincia de Paucartambo y departamento de Cusco, se conectará en derivación a la línea de 33 kV.

**Tabla 3.3. Características técnicas de la S.E. Pillcopata**

| Parámetro                     | Unidad | Alta Tensión | Baja Tensión      |
|-------------------------------|--------|--------------|-------------------|
| Tensión nominal               | kV     | 33           | 22.9              |
| Frecuencia                    | Hz     | 60           | 60                |
| Potencia del Transformador    | MVA    | 2            | 2                 |
| Conexión neutro transformador | -      | Aislado      | Solido            |
| Tipo de conexión              | -      | Delta        | Estrella aterrada |
| Numero de fases               | -      | 3            | 3                 |
| Tensión máxima de operación   | kV     | 34.5         | 24                |

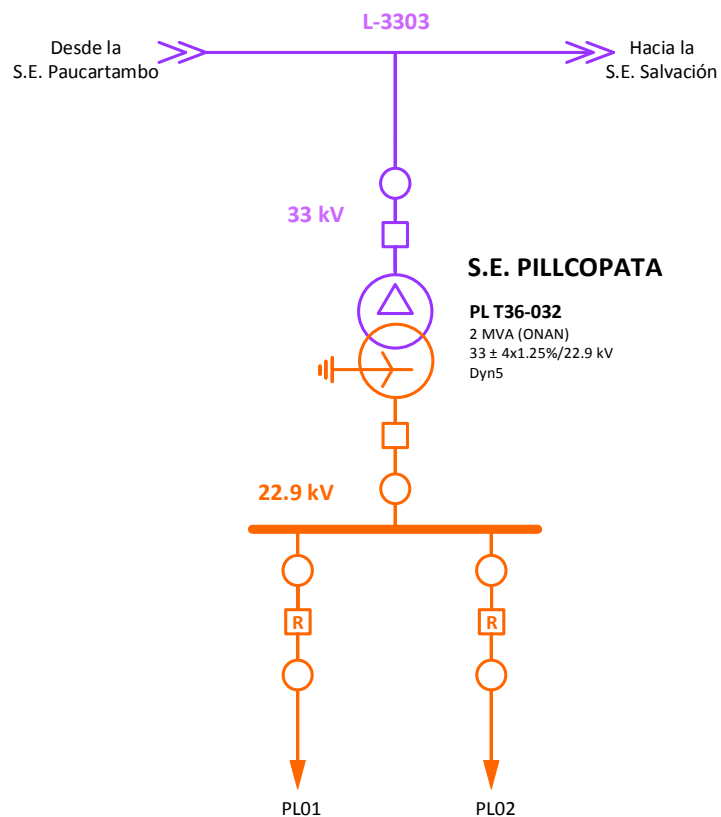
Fuente: Elaborado en base a la información del Proyecto (GORE Cusco)

**Figura 3.6. Diagrama Unifilar S.E. Pillcopata – Previsto para su ingreso.**



Fuente: Extraído y elaborado en base a la información del Proyecto (GORE Cusco)

**Figura 3.7. S.E. Pillcopata prevista para el 2025**



Fuente: Elaborado en base a datos brindados por Gobierno Regional Cusco

#### **3.3.4. LINEA L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación**

La línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación inicia su recorrido en la S.E. Paucartambo hasta la S.E. Salvación, con una longitud total de 90.6 km. Es de tipo aéreo con conductores de aleación de aluminio AAAC, en postes de concreto armado de 15 m.

La línea es de dos tramos, la que inicialmente se construyó desde la subestación de Paucartambo hasta la localidad de Kosñipata, lugar donde se viene construyendo la S.E. Pillcopata, cuya longitud es de 73 km. El siguiente tramo es de S.E. Pillcopata hasta la S.E. Salvación, con una longitud de 18 km. Las características se encuentran en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5.



**Tabla 3.4. Características técnicas de la línea de 33 kV, Paucartambo - Pillcopata**

| <b>Característica</b> | <b>Descripción</b>                                                     |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Sistema               | Trifásico                                                              |
| Potencia Máxima       | 5 MW                                                                   |
| Longitud              | 73 km                                                                  |
| Conductor             | AAAC                                                                   |
| Sección               | 95 mm <sup>2</sup>                                                     |
| Aisladores            | Aislador de porcelana Tipo PIN 56.4 y RPP 35                           |
| Estructuras           | Postes de concreto armado centrifugado 15/200, 15/300, 15/400 y 15/800 |
| Puesta a tierra       | Electrodo de acero recubierto de cobre: 2.4 m, 19 mm, menor a 25Ω      |

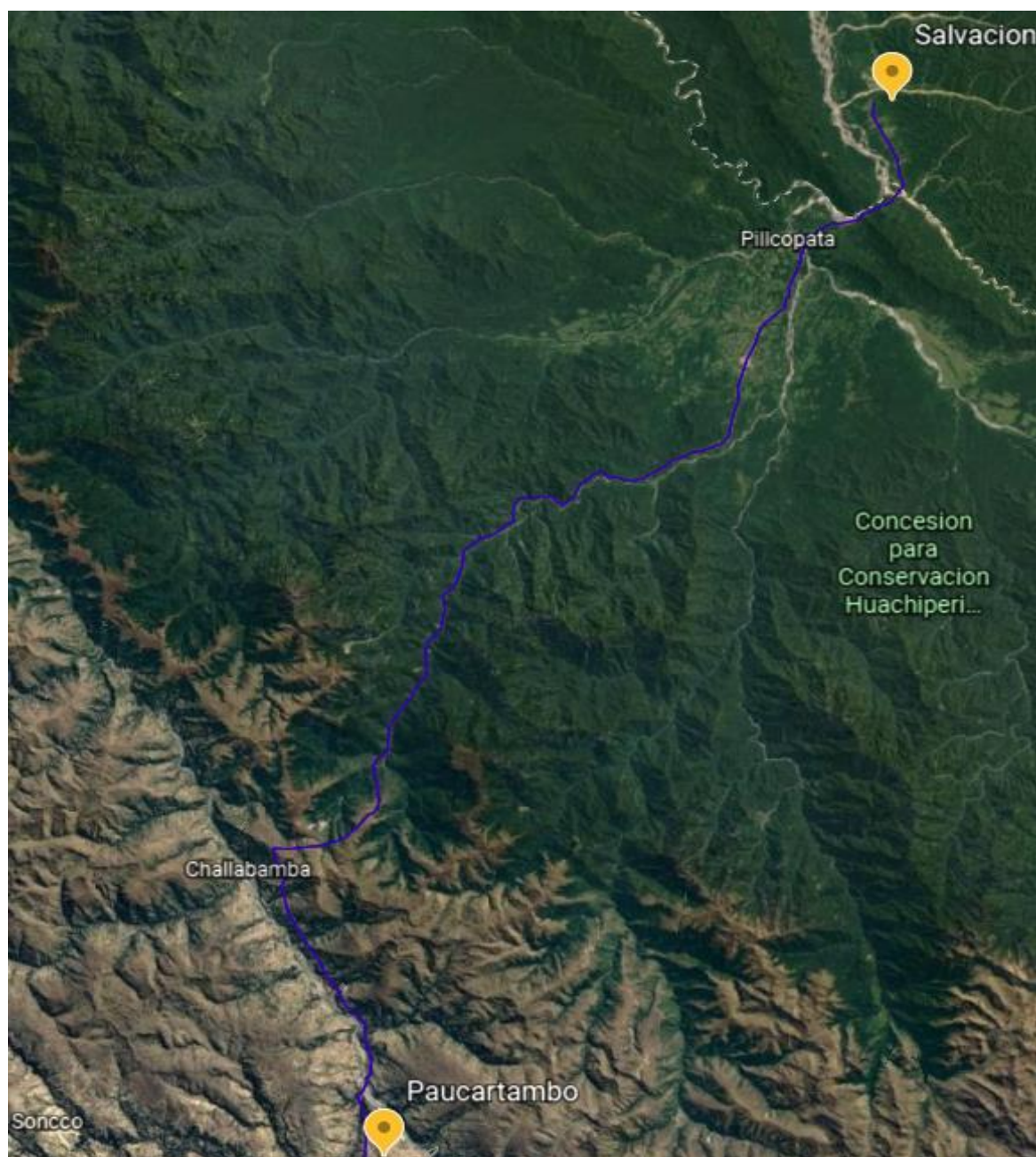
Fuente: Expediente de Replanteo. Obra. Instalación del Sistema Eléctrico en el Distrito de Kosñipata de la Provincia de Paucartambo.

**Tabla 3.5. Características técnicas de la línea en 33 kV, Pillcopata - Salvación**

| <b>Característica</b> | <b>Descripción</b>                                                |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Sistema               | Trifásico                                                         |
| Potencia Máxima       | 2 MW                                                              |
| Longitud              | 18 km                                                             |
| Conductor             | AAAC                                                              |
| Sección               | 70 mm <sup>2</sup>                                                |
| Aisladores            | Aislador de porcelana Tipo PIN 56.4                               |
| Estructuras           | Postes de concreto armado centrifugado 15/200, 15/300, 15/400     |
| Puesta a tierra       | Electrodo de acero recubierto de cobre: 2.4 m, 19 mm, menor a 25Ω |

Fuente: Expediente de Replanteo. Obra. Instalación del Sistema Eléctrico en el Distrito de Kosñipata de la Provincia de Paucartambo

**Figura 3.8. Recorrido de la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación.**



Fuente: Elaborado en base a datos brindados por ELSE.

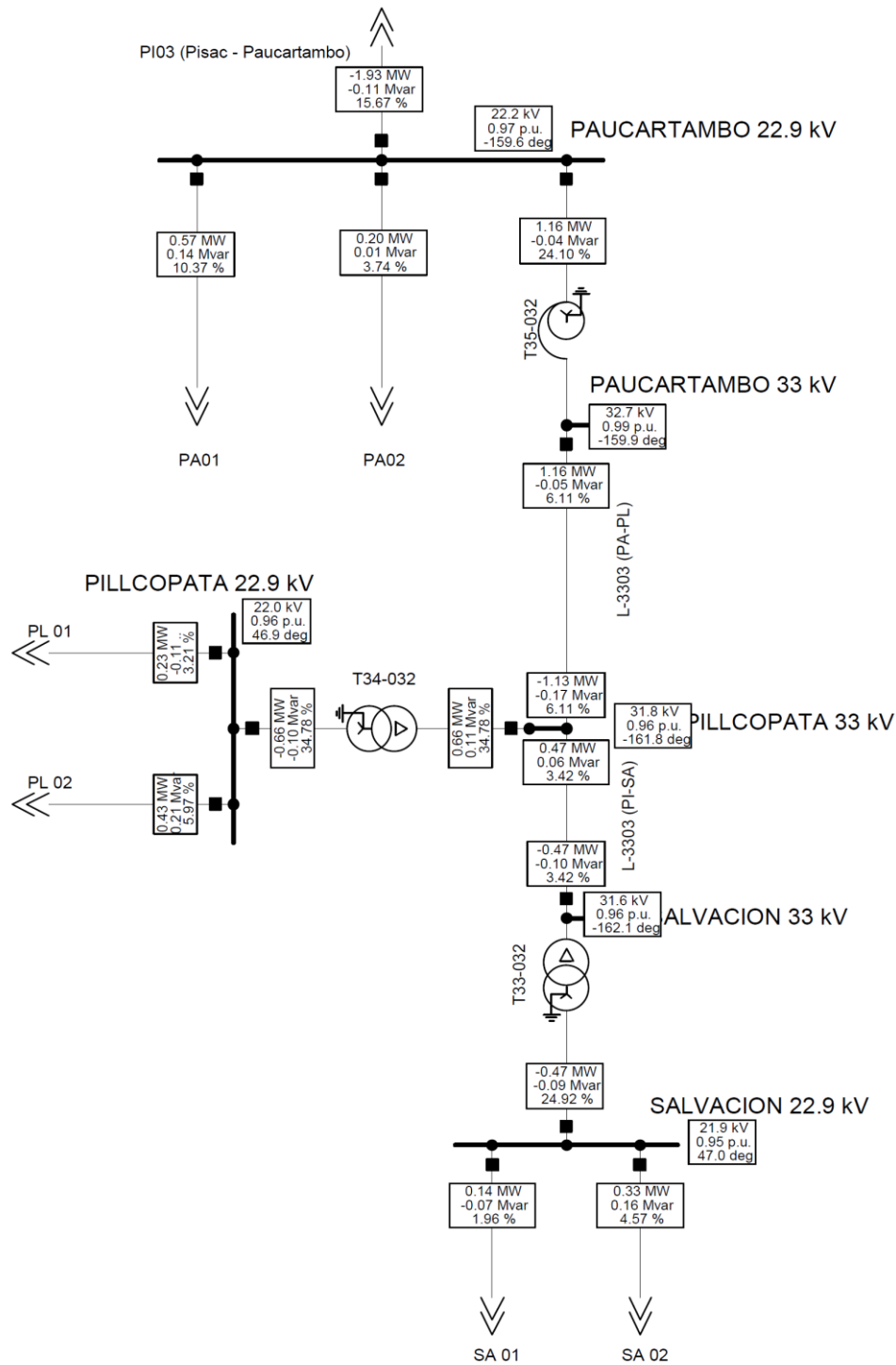
### **3.4. ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO**

#### **3.4.1. SIMULACIONES DE FLUJO DE CARGA**

El modelo del sistema eléctrico en estudio es modelado en el software Power Factory DigSILENT (Versión 15.1.7) con el fin de verificar el flujo de potencia activa y reactiva,

tensiones y corrientes, en las redes eléctricas descritas anteriormente, para las condiciones normales de operación en escenarios de máxima y mínima demanda actuales.

**Figura 3.9. Modelamiento de la red eléctrica en DigSILENT**



Fuente: Elaboración propia en base a la recopilación de información.

### 3.4.2. RESULTADOS DE FLUJO DE CARGA - RED PROYECTADO

**Tabla 3.6. Resultados de flujo de carga Proyectado. Máxima y Mínima Demanda**

| NOMBRE DE BARRA     | Tensión Nominal<br>kV | MÁXIMA DEMANDA             |                                | MÍNIMA DEMANDA             |                                |
|---------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|                     |                       | Tensión U1, Magnitud<br>kV | Tensión u1, por unidad<br>p.u. | Tensión U1, Magnitud<br>kV | Tensión u1, por unidad<br>p.u. |
| PAUCARTAMBO 22.9 kV | 22.9                  | 22.15                      | 0.97                           | 24.21                      | 1.06                           |
| PAUCARTAMBO 33 kV   | 33                    | 32.72                      | 0.99                           | 34.93                      | 1.06                           |
| PILLCOPATA 22.9 kV  | 22.9                  | 21.96                      | 0.96                           | 24.15                      | 1.05                           |
| PILLCOPATA 33 kV    | 33                    | 31.78                      | 0.96                           | 34.82                      | 1.06                           |
| SALVACION 22.9 kV   | 22.9                  | 21.86                      | 0.95                           | 24.13                      | 1.05                           |
| SALVACION 33 kV     | 33                    | 31.62                      | 0.96                           | 34.79                      | 1.05                           |

Fuente: Elaboración propia en base a simulaciones

**Tabla 3.7. Cargabilidad de transformadores de potencia en Máxima Demanda**

| Transformador de Potencia | Tensión    | Potencia Nominal<br>MVA | Cargabilidad<br>% |
|---------------------------|------------|-------------------------|-------------------|
| PAUCARTAMBO               | 33/22.9 kV | 5                       | 24.1              |
| SALVACION                 | 33/22.9 kV | 2                       | 24.9              |
| PILLCOPATA                | 33/22.9 kV | 2                       | 34.8              |

Fuente: Elaboración propia en base a simulaciones

### 3.4.3. SIMULACIONES DE CORTO CIRCUITO – RED PROYECTADO

**Tabla 3.8. Resultado de corto circuito en Máxima y Mínima Demanda**

| NOMBRE DE BARRA     | MÁXIMA DEMANDA |            |          | MÍNIMA DEMANDA |            |          |
|---------------------|----------------|------------|----------|----------------|------------|----------|
|                     | Ik"<br>kA      | Sk"<br>MVA | ip<br>kA | Ik"<br>kA      | Sk"<br>MVA | ip<br>kA |
| PAUCARTAMBO 22.9 kV | 0.505          | 20.01      | 0.916    | 0.513          | 20.34      | 0.931    |
| PAUCARTAMBO 33 kV   | 0.317          | 18.14      | 0.587    | 0.331          | 18.90      | 0.612    |
| PILLCOPATA 22.9 kV  | 0.216          | 8.57       | 0.402    | 0.222          | 8.79       | 0.412    |
| PILLCOPATA 33 kV    | 0.194          | 11.11      | 0.335    | 0.200          | 11.43      | 0.344    |
| SALVACION 22.9 kV   | 0.193          | 7.67       | 0.354    | 0.199          | 7.88       | 0.363    |
| SALVACION 33 kV     | 0.169          | 9.64       | 0.288    | 0.174          | 9.93       | 0.296    |

Fuente: Elaboración propia en base a simulaciones

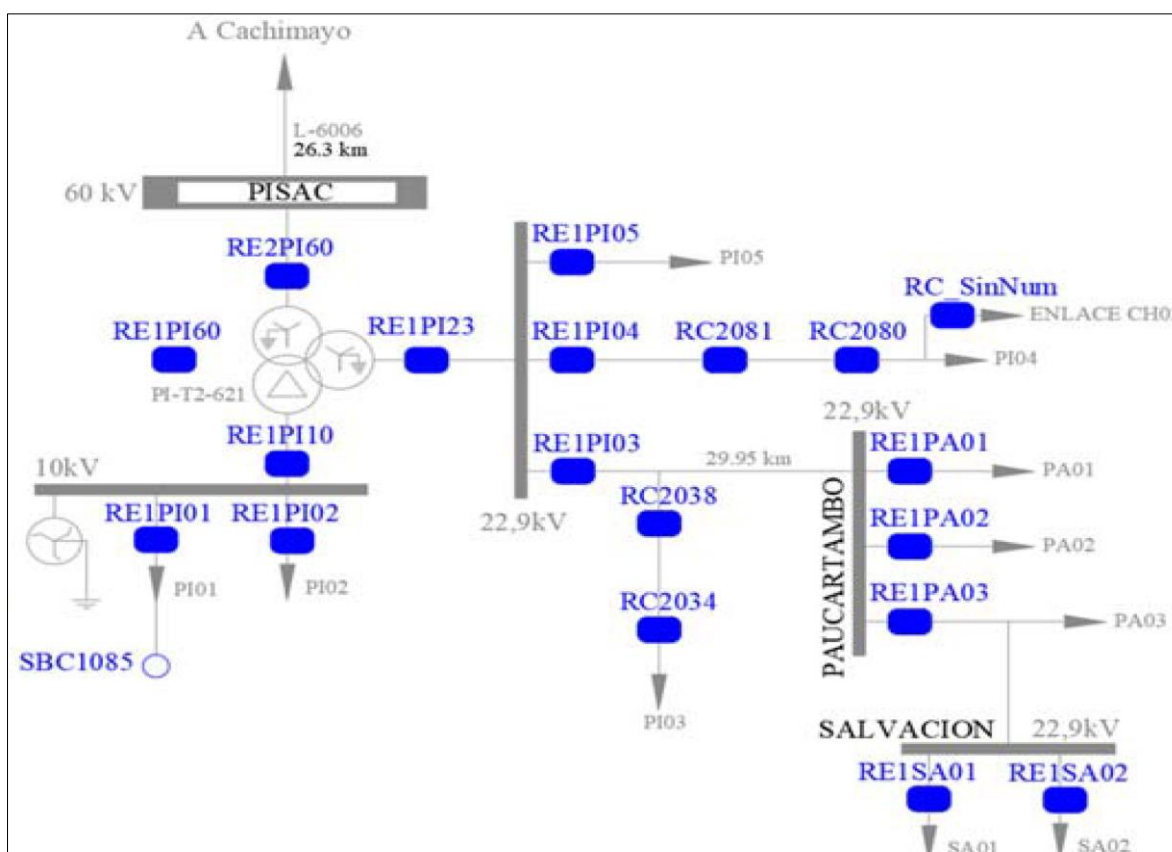
## 3.5. SISTEMA DE PROTECCIÓN ACTUAL

Actualmente, el sistema de protección en la zona de estudio se limita a la S.E. Paucartambo, ya que la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación aún no está en operación. En la

S.E. Paucartambo, el esquema de protección está diseñado para responder principalmente ante condiciones de sobrecorriente, fallas entre fases y fallas a tierra, utilizando los dispositivos de protección tipo 50/51 y 50N/51N.

Los relés de sobrecorriente (50/51) proporcionan protección frente a sobrecargas y cortocircuitos de fase, mientras que los relés de sobrecorriente a tierra (50N/51N) están configurados para detectar fallas a tierra y desconectar el sistema rápidamente en caso de que se presenten. Estos ajustes aseguran que, en caso de una falla en el sistema de media tensión de la subestación, el sistema de protección actúe de manera oportuna y minimice el impacto de la falla en la red. Dado que la línea L-3303 no está en servicio, el sistema de protección actual se centra exclusivamente en proteger los equipos de la S.E. Paucartambo en el nivel de 22.9 kV.

**Figura 3.10. Equipos de protección existentes en al área de influencia del estudio**



Fuente: Extraído del Estudio de EdP. (EdP Estudios S.A.C., Diciembre, 2017)

La Figura 3.10 muestra los equipos de protección existentes en el área de influencia de estudio. Para la presente tesis su importancia es conocer desde la S.E. Pisac desde el nivel de 60 kV, 22.9 kV y la salida del AMT PI03 (Pisac 03 en 22.9 kV)

3.5.1. PROTECCIÓN EN LA S.E. PISAC

En la S.E. Pisac, como parte de las instalaciones de ELSE, se encuentra principalmente el siguiente equipamiento:

- 1 transformador de potencia de 3 devanados 60/22.9/10 kV
- 1 transformador de puesta a tierra (zig-zag) en nivel de 10 kV
- 2 alimentadores PI01 y PI02 en 10kV
- 3 alimentadores PI03, PI04 y PI04 en 22.9kV

La protección que es de interés para el presente estudio son 50/51 y 50N/51N en nivel de tensión de 60 kV, 22.9 kV y PI03 en nivel de 22.9 kV. A continuación, los ajustes:

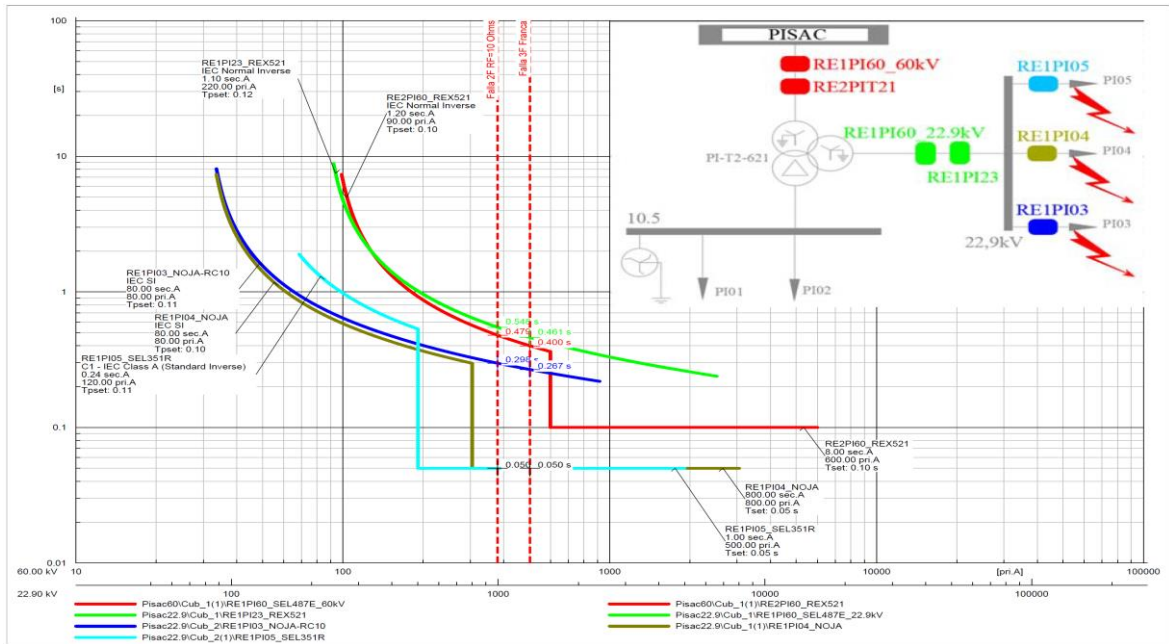
3.5.1.1. Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente de fases

Tabla 3.9. Ajustes actuales S.E. Pisac – Protección sobrecorriente de fases

| S.E. Paucartambo – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |            |        |      |             |       |                     |        |      |        |                      |        |      |          |
|---------------------------------------------------------------|------------|--------|------|-------------|-------|---------------------|--------|------|--------|----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                     | MARCA      | MODELO | kV   | RTT         | RTC   | TIEMPO INVERSO (51) |        |      |        | TIEMPO DEFINIDO (50) |        |      | Recierre |
|                                                               |            |        |      |             |       | I >                 |        | TMS  | Curva  | I >>                 |        | τ >> |          |
|                                                               |            |        |      |             |       | A Sec               | A Prim |      |        | A Sec                | A Prim | (s)  |          |
| RE1PI60                                                       | SEL        | 487E   | 60.0 | 60/0.1 kV   | 75/1  | 1.2                 | 90     | 0.1  | IEC-SI | 8                    | 600    | 0.1  | -        |
| RE1PI23                                                       | ABB        | REX521 | 22.9 | -           | 200/1 | 1.10                | 220.0  | 0.12 | IEC-NI | -                    | -      | -    | -        |
| RE1PI03                                                       | Noja Power | RC10   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1   | 80                  | 80     | 0.11 | IEC-I  | -                    | -      | -    | 2R+Lock  |

Fuente: Elaboración en base a la información brindada por ELSE.

Figura 3.11. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Pisac



Fuente: Elaborado en base a Tabla 3.9





|         |            |       |      |             |     |    |    |      |        |     |     |      |         |
|---------|------------|-------|------|-------------|-----|----|----|------|--------|-----|-----|------|---------|
| RE1PA02 | Schneider  | NULEC | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1 | 50 | 50 | 0.08 | IEC-SI | 350 | 350 | 0.05 | 2R+Lock |
| RE1PA03 | Noja Power | RC10  | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1 | 42 | 42 | 0.14 | IEC-VI | -   | -   | -    | Lock    |

Fuente: Elaboración en base a la información brindada por ELSE.

**Código de Relevó y Marca:** El primer y segundo recloser están identificados como RE1PA01 y RE1PA02 de la marca Schneider, modelo NULEC. El tercer recloser es RE1PA03, de la marca Noja Power, modelo RC10.

**Niveles de Tensión (kV):** Todos los reclosers operan a un nivel de tensión de 22.9/0.1 kV.

**Relación de Transformación de Tensión (RTT) y Relación de Transformación de Corriente (RTC):** La relación de transformación de tensión para los tres dispositivos es 22.9/0.1 kV, y la relación de transformación de corriente es 1/1.

**Ajustes de Tiempo Inverso (51):** RE1PA01 y RE1PA02 tienen un ajuste de tiempo inverso de 50 A (sección secundaria y primaria) y una constante de tiempo (TMS) de 0.08. Ambos usan la curva IEC-SI.

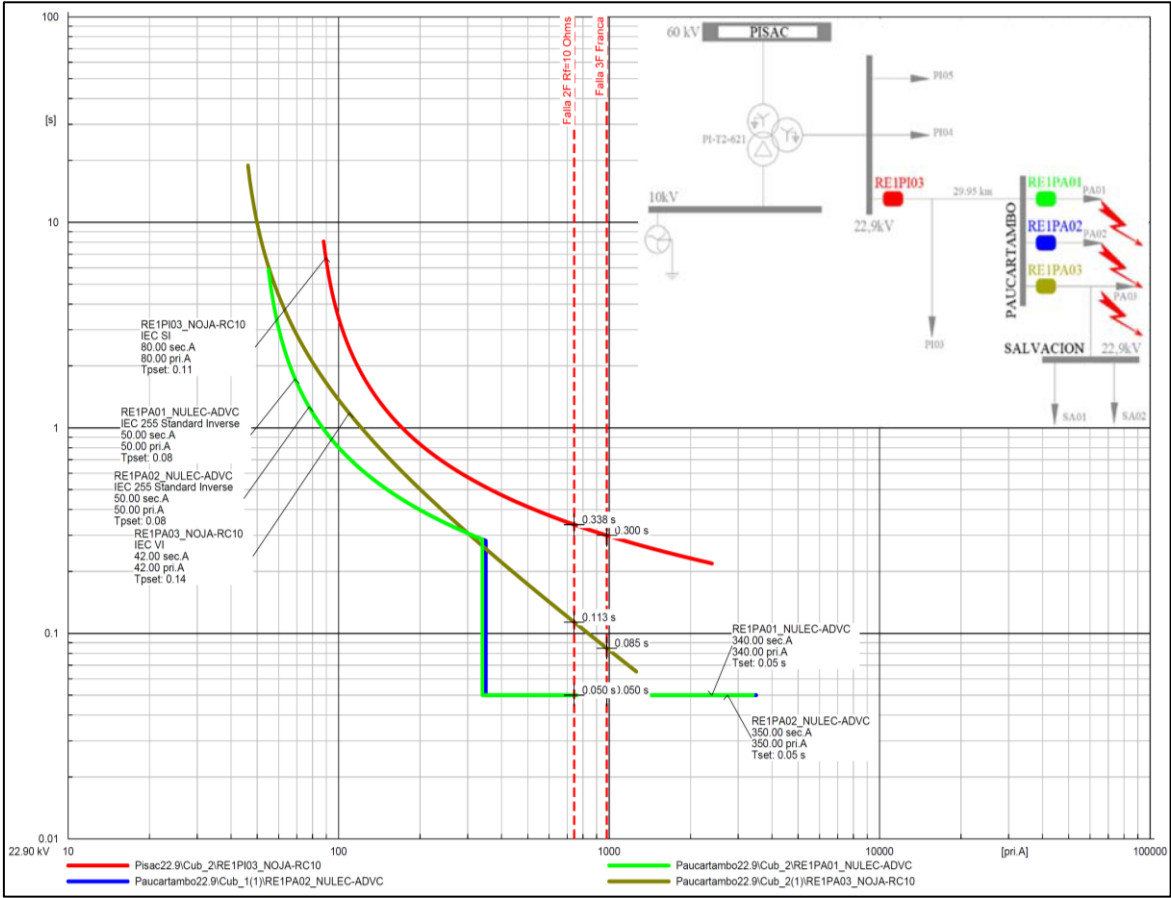
RE1PA03 tiene un ajuste de 42 A (en ambas secciones) y una TMS de 0.14 con una curva IEC-VI.

**Ajustes de Tiempo Definido (50):** En los reclosers RE1PA01 y RE1PA02, los ajustes de corriente instantánea ( $I_{>>}$ ) son de 340 A y 350 A respectivamente, con un tiempo de activación ( $t_{>>}$ ) de 0.05 segundos. Ambos dispositivos tienen un ajuste de recierre de 2R + Lock (dos recierres antes de bloqueo).

RE1PA03 no presenta valores para el tiempo definido (50) y su recierre está configurado solo en Lock (bloqueo).



Figura 3.13. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Paucartambo



Fuente: Elaborado en base a la Tabla 3.11

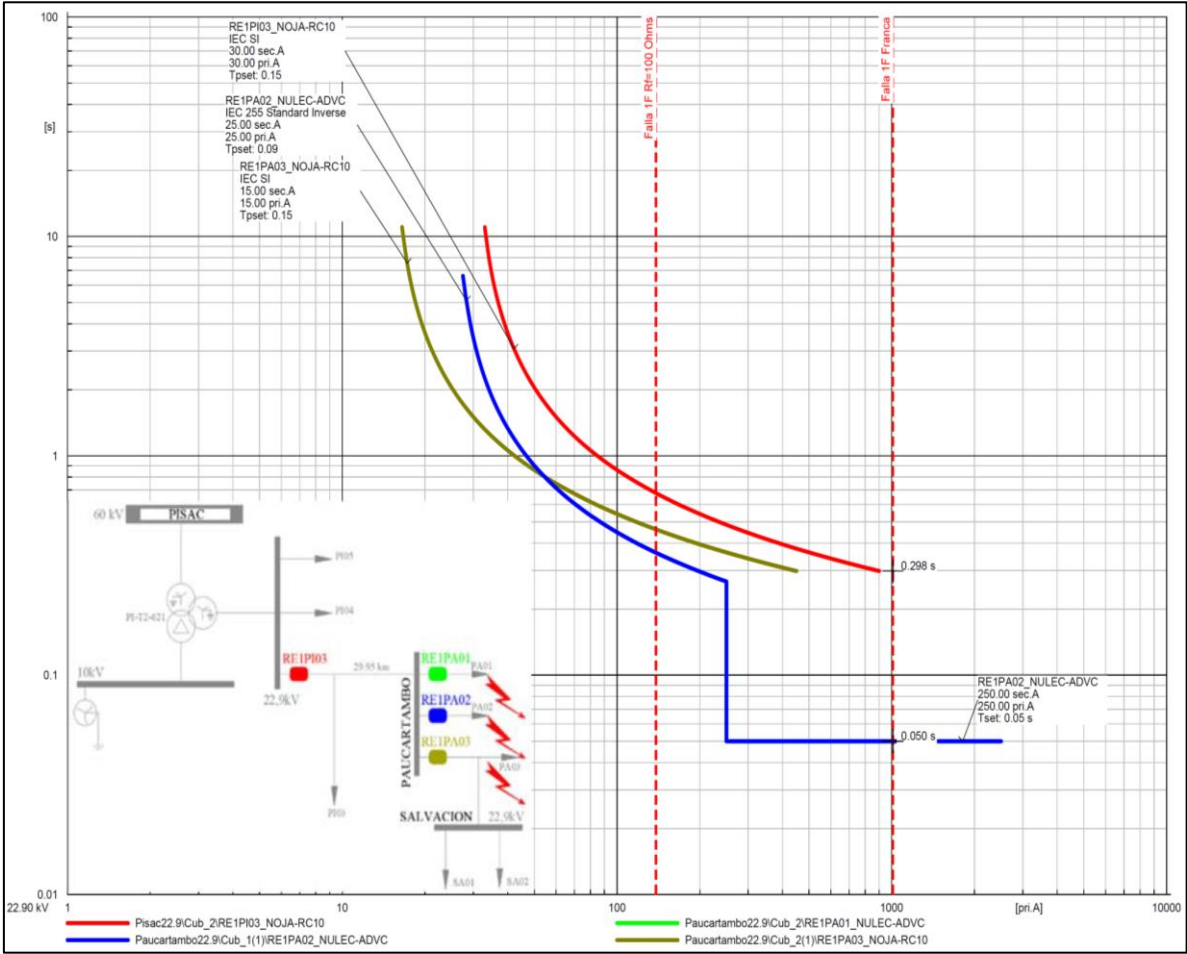
3.5.2.2. Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente fase a tierra

Tabla 3.12. Ajustes actuales S.E. Paucartambo – Protección sobrecorriente fase a tierra

| S.E. Paucartambo – Sobrecorriente de fase a tierra – Ajustes actuales |            |        |      |             |     |                      |        |      |        |                       |        |      |          |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|--------|------|-------------|-----|----------------------|--------|------|--------|-----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                             | MARCA      | MODELO | kV   | RTT         | RTC | Tiempo Inverso (51N) |        |      |        | Tiempo Definido (50N) |        |      | Recierre |
|                                                                       |            |        |      |             |     | I0 >                 |        | TMS  | Curva  | I0 >>                 |        | τ >> |          |
|                                                                       |            |        |      |             |     | A Sec                | A Prim |      |        | A Sec                 | A Prim | (s)  |          |
| RE1PA01                                                               | Schneider  | NULEC  | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1 | 25                   | 25     | 0.09 | IEC-SI | 250                   | 250    | 0.05 | 2R+Lock  |
| RE1PA02                                                               | Schneider  | NULEC  | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1 | 25                   | 25     | 0.09 | IEC-SI | 250                   | 250    | 0.05 | 2R+Lock  |
| RE1PA03                                                               | Noja Power | RC10   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1 | 15                   | 15     | 0.15 | IEC-I  | --                    | --     | --   | Lock     |

Fuente: Elaboración en base a la información brindada por ELSE.

Figura 3.14. Curvas de ajustes de protección 50N/51N – S.E. Paucartambo



Fuente: Elaborado en base a la Tabla 3.12

3.5.3. PROTECCIÓN EN LA S.E. SALVACIÓN

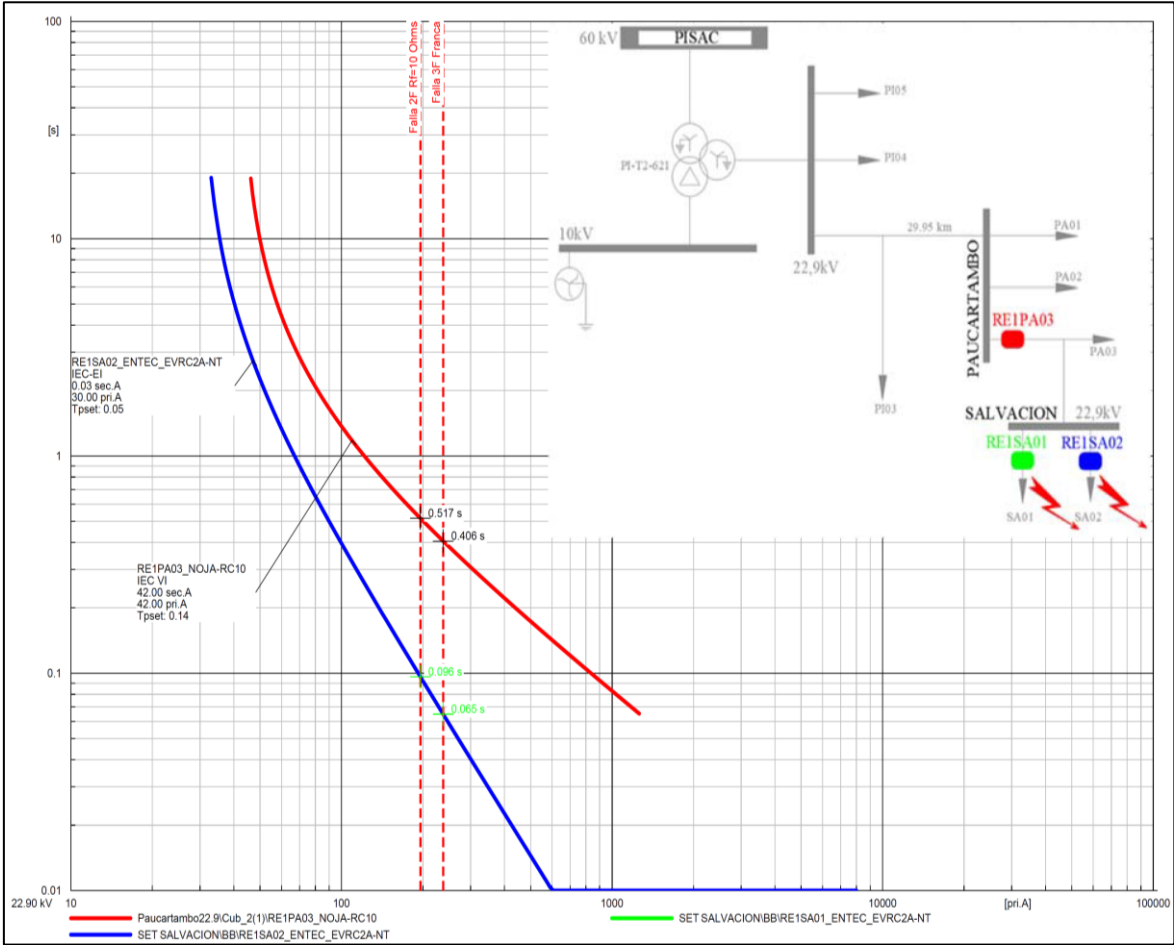
3.5.3.1. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente de fases

Tabla 3.13. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente de fases

| S.E. Salvación – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |       |           |      |             |        |                     |        |      |        |                      |        |      |          |
|-------------------------------------------------------------|-------|-----------|------|-------------|--------|---------------------|--------|------|--------|----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                   | MARCA | MODELO    | kV   | RTT         | RTC    | TIEMPO INVERSO (51) |        |      |        | TIEMPO DEFINIDO (50) |        |      | Recierre |
|                                                             |       |           |      |             |        | I >                 |        | TMS  | Curva  | I >>                 |        | t >> |          |
|                                                             |       |           |      |             |        | A Sec               | A Prim |      |        | A Sec                | A Prim | (s)  |          |
| RE1SA01                                                     | ENTEC | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1000/1 | 0.03                | 30     | 0.05 | IEC-EI |                      |        |      | 2R+Lock  |
| RE1SA02                                                     | ENTEC | EVRC2A-NT | 0    | 22.9/0.1 kV | 1000/1 | 0.03                | 30     | 0.05 | IEC-EI | 0.800                | 800    | 0.00 | 2R+Lock  |

Fuente: Electro Sur Este (EdP Estudios S.A.C., Diciembre, 2017)

Figura 3.15. Curvas de ajustes de protección 50/51 – S.E. Salvación



Fuente: Elaborado en base a la Tabla 3.13

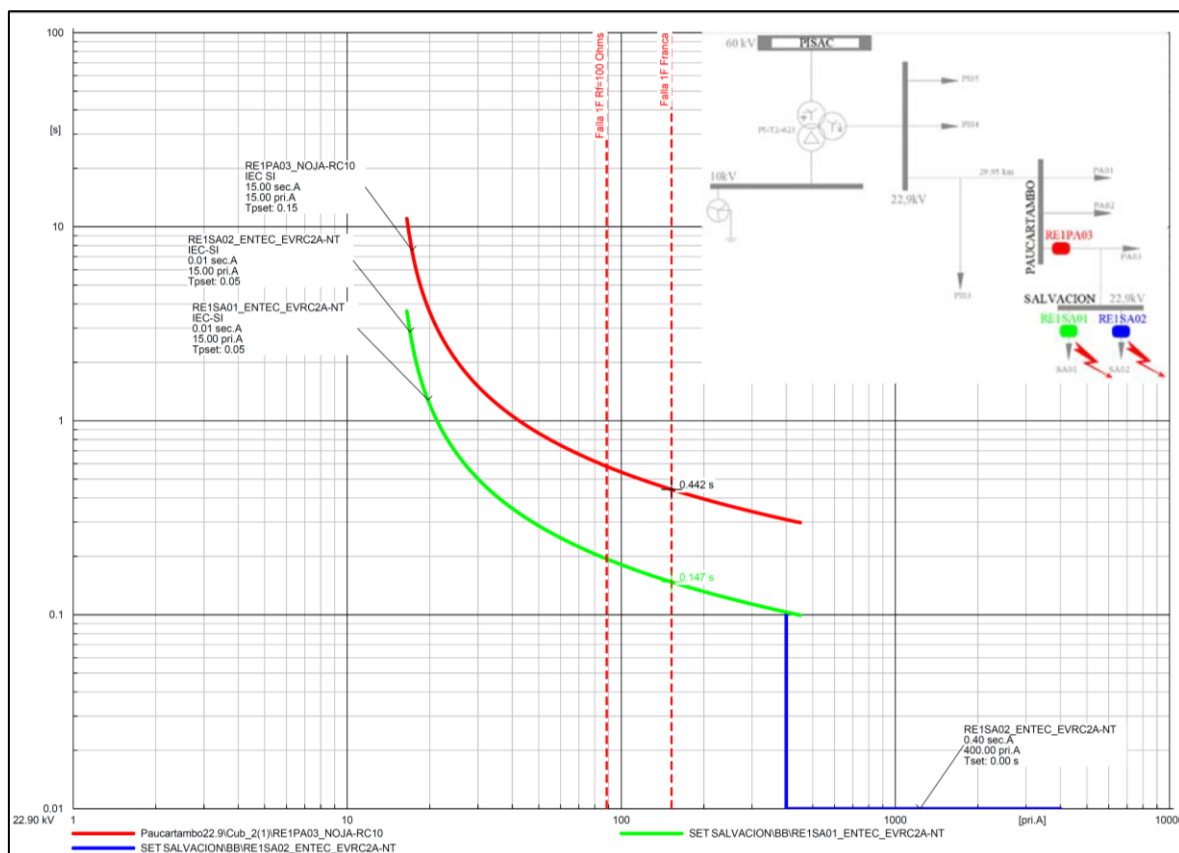
3.5.3.2. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente fase a tierra

Tabla 3.14. Ajustes actuales S.E. Salvación – Protección sobrecorriente fase a tierra

| S.E. Paucartambo – Sobrecorriente de fase a tierra – Ajustes actuales |       |           |      |             |        |                      |        |      |        |                       |        |      |          |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|-----------|------|-------------|--------|----------------------|--------|------|--------|-----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                             | MARCA | MODELO    | kV   | RTT         | RTC    | Tiempo Inverso (51N) |        |      |        | Tiempo Definido (50N) |        |      | Recierre |
|                                                                       |       |           |      |             |        | I0 >                 |        | TMS  | Curva  | I0 >>                 |        | t >> |          |
|                                                                       |       |           |      |             |        | A Sec                | A Prim |      |        | A Sec                 | A Prim |      |          |
| RE1SA01                                                               | ENTEC | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1000/1 | 0.015                | 15     | 0.05 | IEC-SI |                       |        |      | 2R+Lock  |
| RE1SA02                                                               | ENTEC | EVRC2A-NT | 0    | 22.9/0.1 kV | 1000/1 | 0.015                | 15     | 0.05 | IEC-SI | 0.400                 | 400    | 0.00 | 2R+Lock  |

Fuente: Electro Sur Este (EdP Estudios S.A.C., Diciembre, 2017)

**Figura 3.16. Curvas de ajustes de protección 50N/51N – S.E. Salvación**



Fuente: Elaboración en base a la Tabla 3.14

### 3.5.3.3. Normas De Coordinación de Protección

✓ IEC 60255:

Título: *Measuring relays and protection equipment – General requirements*

Definición: Esta norma especifica los requisitos generales para los relés de protección eléctricos y equipos de medida.

Autor: Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

✓ IEC 60909:

Título: *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*

Definición: Proporciona métodos para calcular corrientes de cortocircuito en sistemas de corriente alterna trifásica.

Autor: Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

✓ IEC 60870: Título: *Telecontrol equipment and systems*

Definición: Conjunto de normas para sistemas de telecontrol y comunicación en sistemas eléctricos, especialmente SCADA.

Autor: Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

✓ IEEE C37.90:

Título: Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus

Definición: Establece requisitos generales de desempeño para relés y sistemas asociados a aparatos de potencia.

Autor: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

✓ IEC 61850:

Título: Communication networks and systems for power utility automation

Definición: Norma clave para la automatización de subestaciones eléctricas, define protocolos de comunicación e interoperabilidad.

Autor: Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

✓ IEEE C37.91:

Título: Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers

Definición: Guía para la correcta aplicación de relés de protección en transformadores de potencia.

Autor: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

✓ IEEE C37.92:

Título: Guide for the Circuit Breaker Applications

Definición: Guía para la aplicación adecuada de interruptores automáticos en sistemas eléctricos.

Autor: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

## **CAPÍTULO 4.**

### **AJUSTES DE PROTECCIÓN PROPUESTO**

---

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se desarrolla el análisis y la propuesta de ajustes de protección para la línea L-3303 en 33 kV, que conecta las subestaciones Paucartambo y Salvación, considerando la inserción de la nueva S.E. Pillcopata. La implementación de esta subestación introduce cambios en la red que requieren una revisión de los ajustes actuales de protección, para asegurar la selectividad, confiabilidad y coordinación adecuada del sistema.

El objetivo de este capítulo es proponer nuevos ajustes de protección que garanticen una respuesta eficiente y rápida ante posibles fallas, minimizando el impacto negativo para la red, se analizan los ajustes actuales, se estudian los efectos de la inserción de la S.E. Pillcopata y, finalmente, se verifica el desempeño de los ajustes propuestos a través de simulaciones, demostrando la mejora en la protección de la línea.

#### **4.2. IMPACTO DE LA INSERCIÓN DE LA S.E. PILLCOPATA**

La incorporación de la Subestación Eléctrica (S.E.) Pillcopata en la línea L-3303, que conecta las subestaciones de Paucartambo y Salvación, trae consigo una serie de implicancias técnicas en cuanto a la configuración y los ajustes de protección. Es importante resaltar que la línea L-3303 es de tipo radial y que la S.E. Pillcopata se integra como una derivación de esta línea de 33 kV. Actualmente, la línea se encuentra operando a un nivel de 22.9 kV entre Paucartambo y Salvación, por lo que se requiere la instalación de un transformador elevador en la S.E. Paucartambo, de 22.9 a 33 kV, que permitirá el correcto suministro a la línea en su nivel nominal de 33 kV. A continuación, se analizan los efectos específicos de esta inserción:

##### **4.2.1. Impacto en los Niveles de Corriente de Cortocircuito**

La adición de la S.E. Pillcopata como una derivación de la línea radial L-3303 modifica los niveles de corriente de cortocircuito a lo largo de la línea. Al operar a 33 kV, se incrementa la capacidad de transporte de corriente, lo que potencialmente eleva los valores de corriente

de falla en los puntos críticos. Este incremento en los niveles de corriente de cortocircuito requiere ajustes específicos en los relés de protección para adaptarse a la nueva configuración y asegurar que los dispositivos actúen de manera oportuna en caso de fallas.

#### **4.2.2. Modificación de la Topología y Operación de la Línea**

La línea de 33 kV se encuentra operando actualmente a 22.9 kV, lo cual cambia al implementarse el transformador elevador en Paucartambo. Este ajuste permitirá que la línea opere en su nivel nominal de 33 kV, alterando las características de carga y distribución de la red. La derivación hacia la S.E. Pillcopata introduce un nuevo punto de conexión que afecta la topología de la línea, por lo que es necesario recalibrar los ajustes de protección para reflejar estas nuevas condiciones operativas, asegurando una adecuada coordinación en los diferentes tramos de la línea.

#### **4.2.3. Consideraciones de Coordinación de las Protecciones en una Línea Radial**

Dado que la línea L-3303, es de tipo radial, la selectividad y coordinación de los dispositivos de protección es crítica. La incorporación de la S.E. Pillcopata demanda una reevaluación de los tiempos de actuación de los relés para mantener un esquema de protección coordinado que permita identificar fallas en distintos puntos de la línea sin afectar áreas no involucradas. Los ajustes de protección deben garantizar que las fallas aguas abajo (en dirección a Salvación) sean despejadas rápidamente por los dispositivos más cercanos a la falla, evitando la actuación innecesaria de protecciones en Paucartambo o en la derivación hacia Pillcopata.

#### **4.2.4. Revisión de las Curvas de Tiempo Inverso y Definido**

Con el nuevo nivel de operación a 33 kV y la inserción de la S.E. Pillcopata, los ajustes de las curvas de tiempo inverso (51) y de tiempo definido (50) deben ser recalibrados para adaptarse a la capacidad de la línea y a la distribución de carga. Los valores de corriente de arranque y los tiempos de despeje de fallas deberán ser optimizados para reflejar los nuevos niveles de operación y la presencia de la derivación hacia la S.E. Pillcopata. Estos ajustes en las curvas permitirán una respuesta rápida y efectiva ante fallas, minimizando tiempos de actuación sin comprometer la selectividad.

### **4.3. PROPUESTA DE NUEVOS AJUSTES DE PROTECCIÓN**

La incorporación de la S.E. Pillcopata en la línea de 33 kV L-3303, y la transición de operación de esta línea al nivel nominal de 33 kV mediante el transformador elevador en la S.E. Paucartambo, requiere una actualización y recalibración de los ajustes de protección. Esta sección describe la propuesta de ajustes optimizados para los sistemas de protección de sobrecorriente de fase-fase y de fallas fase-tierra, tomando en cuenta las características

específicas de la línea radial y las nuevas condiciones de operación. Los ajustes propuestos tienen como objetivo asegurar una rápida y selectiva respuesta ante fallas, mejorando la confiabilidad de la protección en todo el sistema.

#### **4.3.1. Ubicación de las protecciones en la S.E. Paucartambo, Salvación y Pillcopata**

En la Figura 4.1 se muestra la configuración de las subestaciones de Paucartambo, Pillcopata y Salvación, junto con sus principales equipos de protección y los equipos como transformadores de potencia, también se muestra a la línea de 33 kV L-3303, entre las subestaciones de Paucartambo, Salvación y Pillcopata. A continuación, se describe la ubicación de los equipos de protección destacados:

##### **Subestación Paucartambo (S.E. Paucartambo):**

- Cuenta con un Interruptor-Recloser en nivel de 22.9 kV y el relé RE1PA03
- Incluye un relé de protección denominado REL3303, configurado para gestionar las fallas en la línea principal.

##### **Subestación Salvación (S.E. Salvación):**

- Equipos de protección como el interruptor IN605 de 16 kA para gestionar perturbaciones y protección del transformador. Incluye relé de protección RESA33
- Relés de protección RE1SA01 y RE1SA02 que aseguran la actuación coordinada en caso de fallas en alimentadores de MT en 22.9 kV

##### **Subestación Pillcopata (S.E. Pillcopata):**

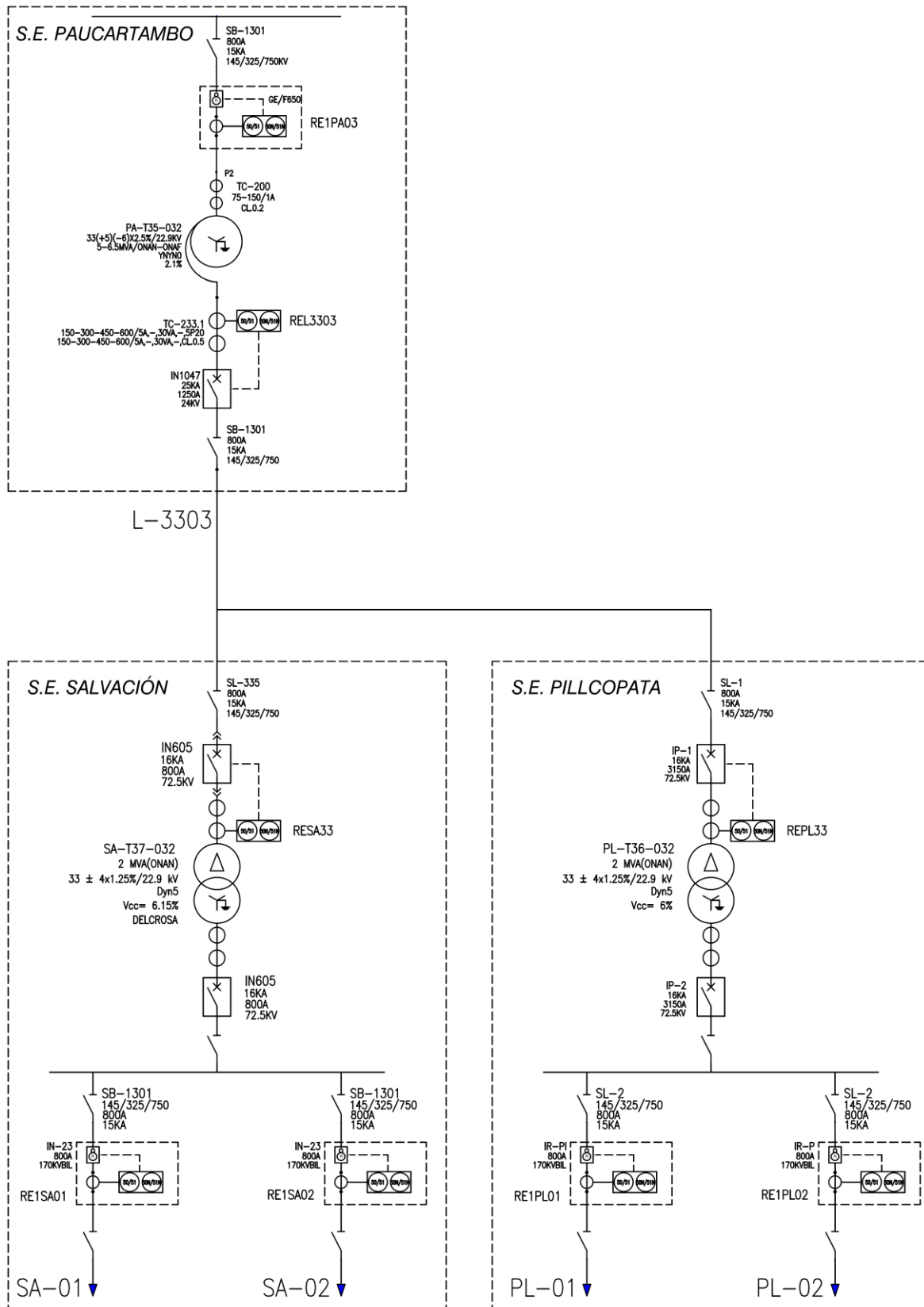
- Equipos de protección como el interruptor IP-1 d para gestionar perturbaciones y protección del transformador. Incluye relé de protección REPL33
- Relés de protección RE1PL01 y RE1PL02 que aseguran la actuación coordinada en caso de fallas en alimentadores de MT en 22.9 kV

##### **Línea L-3303 en 33 kV:**

Se extiende entre las subestaciones Paucartambo, Pillcopata y Salvación.



**Figura 4.1. Diagrama unifilar simplificado: Ubicación de equipos de protección**



Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.2. S.E. Pillcopata - Protección 50/51 Propuesto**

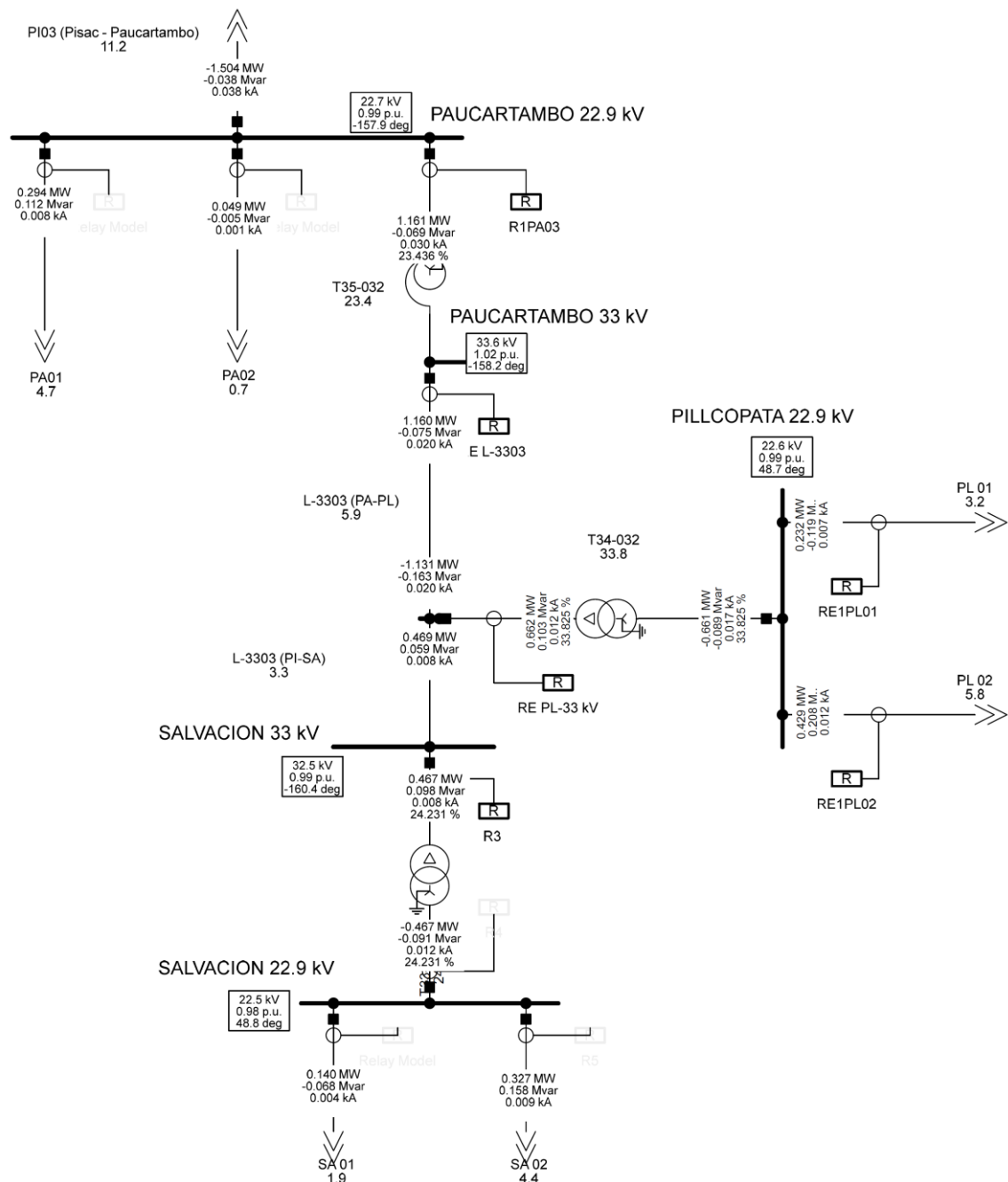
La protección de sobrecorriente de fases 51, se realiza tomando en consideración lo siguiente:

- Alimentador de MT : Mayor a 150 % de la Máxima Demanda
- Transformador de potencia : Entre el 100 % y 130 % de potencia nominal
- Tiempo de coordinación entre 2 relés de protección: Mínimo 200 ms
- Para la línea de 33 kV : Mayor a 150 % de la Máxima Demanda

La protección de sobrecorriente de fases 50, se realiza tomando en consideración lo siguiente:

- Alimentador de MT : Despejar las fallas hasta el 80 % de la línea o alimentador ante fallas trifásicas

**Figura 4.2. Diagrama unifilar y flujo en máxima demanda: Línea L-3303 en 33 kV y subestaciones Paucartambo, Salvación y Pillcopata.**



Fuente: Elaboración en base a simulaciones en el software DIGSILENT

La Figura 4.2 muestra un diagrama unifilar generado en PowerFactory DIGSILENT, representando un flujo de potencia en una red eléctrica que conecta las subestaciones de Paucartambo, Salvación, Pillcopata y la línea de 33 kV.

Se visualizan los flujos de potencia activa y reactiva en cada elemento. Por ejemplo, en la barra de Paucartambo 22.9 kV, hay un flujo de 0.294 MW y 0.112 Mvar, mientras que en

otras secciones como Salvación en 33 kV, se muestran potencias y ángulos de fase diferentes. Se incluyen símbolos de relés como R1PA03 y RE1PL01, que indican puntos de protección en la red, asegurando la seguridad de la operación del sistema eléctrico.

**Tabla 4.1. Determinación de ajustes de protección de la protección 50/51 en el área de influencia: S.E. Pisac, Paucartambo y Pillcopata**

| Código Equipo Protegido | Equipo Protegido |       |                    | Capacidad Equipo | Máxima Demanda |    | Protección Sobrecorriente Fases |     | Observación         |
|-------------------------|------------------|-------|--------------------|------------------|----------------|----|---------------------------------|-----|---------------------|
|                         | kV               | TC    | Equipo             | A                | kW             | A  | Calculo corriente I>            | 51  |                     |
| PI-22                   | 22.9             | 200/1 | Barra 22.9 kV      | 176              | 1943           | 49 | $> 1.5 \times I_{MD}$           | 220 | 1.3 x Cap de equipo |
| PI03                    | 22.9             | 1/1   | AL. 3x70 A 22.9 kV | 255              | 1818           | 45 | $> 1.5 \times I_{MD}$           | 170 |                     |
| PA03                    | 22.9             | 50/1  | T35-032 5 MW       | 126              | 1161           | 30 | $> 1.0 \times P_{Nom}$          | 125 |                     |
| L-3303                  | 33               | 125/5 | AL. 3x90 A 33 kV   | 340              | 1160           | 20 | $> 1.2 \times 2 \times P_{Nom}$ | 85  |                     |
| PL-33                   | 33               | 50/1  | T34-032 2 MW       | 35               | 662            | 12 | $> 1.3 \times P_{Nom}$          | 45  |                     |
| PL-01                   | 22.9             | 50/1  | AL. 3x50 A 22.9 kV | 210              | 231            | 7  | $> 1.5 \times I_{MD}$           | 20  |                     |
| PL-02                   | 22.9             | 50/1  | AL. 3x50 A 22.9 kV | 210              | 429            | 12 | $> 1.5 \times I_{MD}$           | 20  |                     |

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos y criterios de ajuste

#### 4.3.2.1. Ajustes Propuestos S.E. Pillcopata – Protección sobrecorriente 50/51

**Tabla 4.2. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de fases entre la S.E. Pillcopata, Paucartambo y Pisac**

| S.E. Salvación – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |            |           |      |             |       |                     |        |      |        |                      |        |              |
|-------------------------------------------------------------|------------|-----------|------|-------------|-------|---------------------|--------|------|--------|----------------------|--------|--------------|
| COD. RELE                                                   | MARCA      | MODELO    | kV   | RTT         | RTC   | TIEMPO INVERSO (51) |        |      |        | TIEMPO DEFINIDO (50) |        |              |
|                                                             |            |           |      |             |       | I >                 |        | TMS  | Curva  | I >>                 |        | Recierre     |
|                                                             |            |           |      |             |       | A Sec               | A Prim |      |        | A Sec                | A Prim |              |
| REPI23                                                      | ABB        | REX521    | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 200/1 | 5.5                 | 220    | 0.13 | IEC-SI | -                    | -      | -            |
| RE1PI03                                                     | Noja Nulec | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1   | 170                 | 170    | 0.12 | IEC-SI | -                    | -      | 2R+Lock      |
| RE1PA03                                                     | Noja Nulec | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 2.5                 | 125    | 0.09 | IEC-SI | -                    | -      | -            |
| REL3303                                                     | SEL        | SEL-351   | 33   | 33/0.1 kV   | 125/5 | 0.68                | 85     | 0.05 | IEC-SI | -                    | -      | -            |
| REPL-33                                                     | SEL        | SEL-351   | 33   | 33/0.1 kV   | 50/1  | 0.9                 | 45     | 0.05 | IEC-SI | -                    | -      | -            |
| RE1PL01                                                     | SEL        | SEL-351   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 0.4                 | 20     | 0.5  | IEC-SI | 3.8                  | 190    | 0.05 2R+Lock |
| RE1PL02                                                     | SEL        | SEL-351   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 0.4                 | 20     | 0.5  | IEC-SI | 3.8                  | 190    | 0.05 2R+Lock |

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos y criterios de ajuste

El cuadro muestra los ajustes propuestos para la protección de sobrecorriente de fase (funciones 50/51) en la Subestación de Pillcopata, específicamente en relación con la subestación de Salvación. La tabla detalla diferentes relés de protección, indicando su código, marca, modelo, y relación de transformación de corriente (RTC) y tensión (RTT). Además, se especifican los ajustes de tiempo inverso (función 51) y tiempo definido (función 50) para cada relé.

Para el tiempo inverso (51), se incluye:

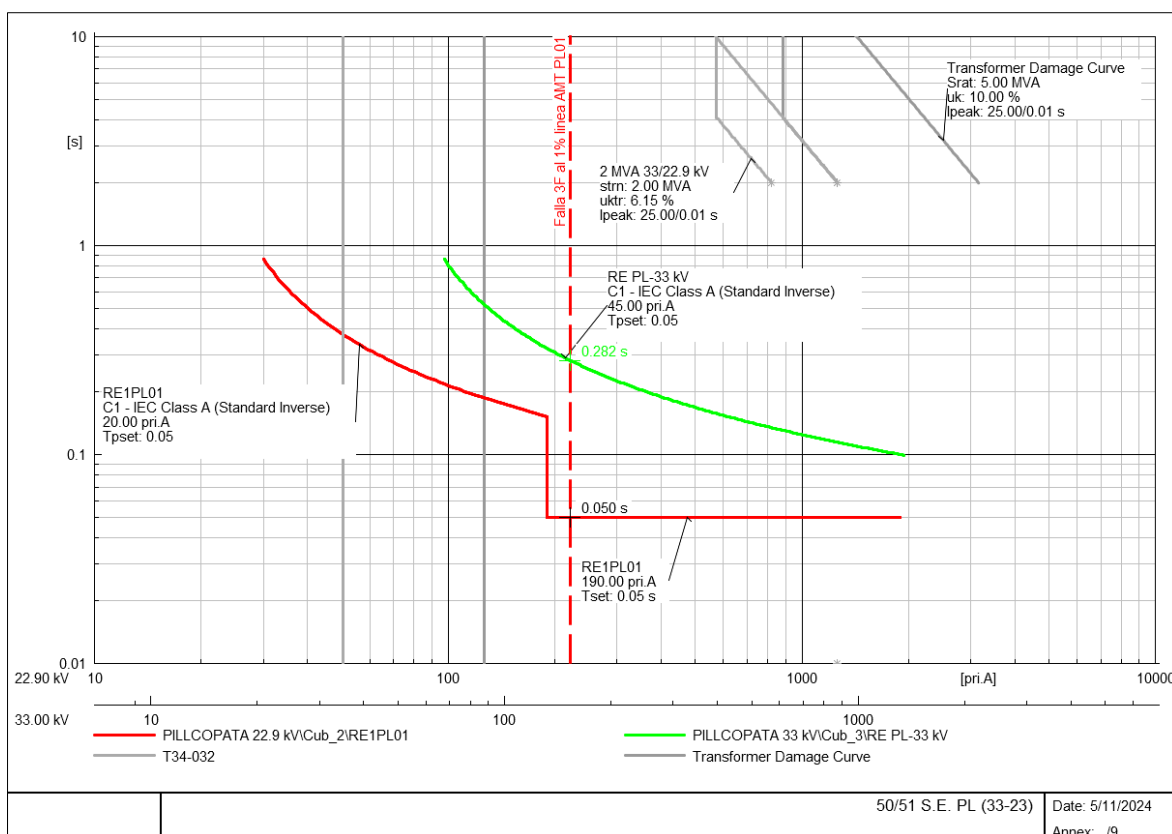
- El ajuste de corriente en amperios secundarios y primarios.
- El tiempo multiplicador (TMS).
- La curva de tiempo seleccionada (IEC-SI).

Para el tiempo definido (50), se incluye:

- El ajuste de corriente ( $I_{>>}$ ) en amperios secundarios y primarios.
- El tiempo de operación ( $t_{>>}$  en segundos).

Finalmente, en la columna de "Recierre", se indica si el sistema tiene un recierre automático configurado, como "2R+Lock", que significa dos recierres con bloqueo posterior.

**Figura 4.3. Ajustes Propuesto - Curva de coordinación de protección 50/51 de la S.E. Pillcopata.**



Fuente: Elaborado en base a simulaciones en DiGSILENT

Las Figura 4.3 muestra las curvas de coordinación de tiempo para la protección de sobrecorriente en la subestación de Pillcopata en nivel de 22.9 kV y 33 kV. Estas curvas

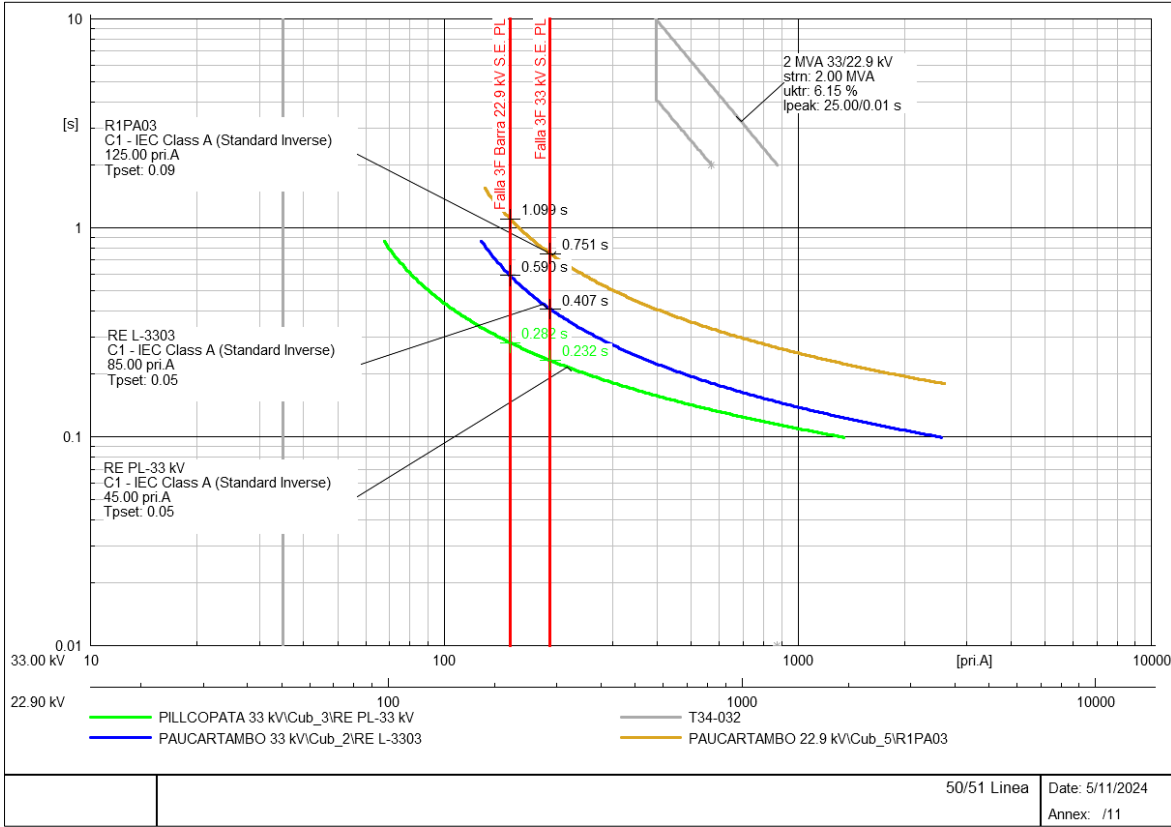
permiten asegurar la secuencia correcta de operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero.

Se muestra las curvas de operación para los relés RE1PL01 (22.9 kV, en color rojo) y RE PL-33 kV (en color verde). Ambos están configurados con una curva de tiempo inverso estándar (IEC Class A).

Los valores de ajuste para el disparo y el tiempo (Tpset) son de 0.05 s en ambos casos, mientras que los valores de corriente de ajuste difieren, siendo 0.40 sec.A para el RE1PL01 y 0.90 sec.A para el RE PL-33 kV.

Las curvas se presentan en una gráfica de tiempo (en segundos) vs. corriente primaria (en amperios), donde se observa que el relé en 22.9 kV actúa más rápido para corrientes menores, mientras que el de 33 kV tiene un mayor tiempo de retardo para coordinarse adecuadamente.

**Figura 4.4. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección 51. Entre la S.E. Paucartambo, Línea y S.E. Pillcopata.**



Fuente: Elaborado en base a simulaciones en DiGSILENT

Las Figura 4.4 muestra las curvas de coordinación de tiempo para la protección de sobrecorriente en la subestación Paucartambo, la línea y la subestación de Pillcopata en nivel

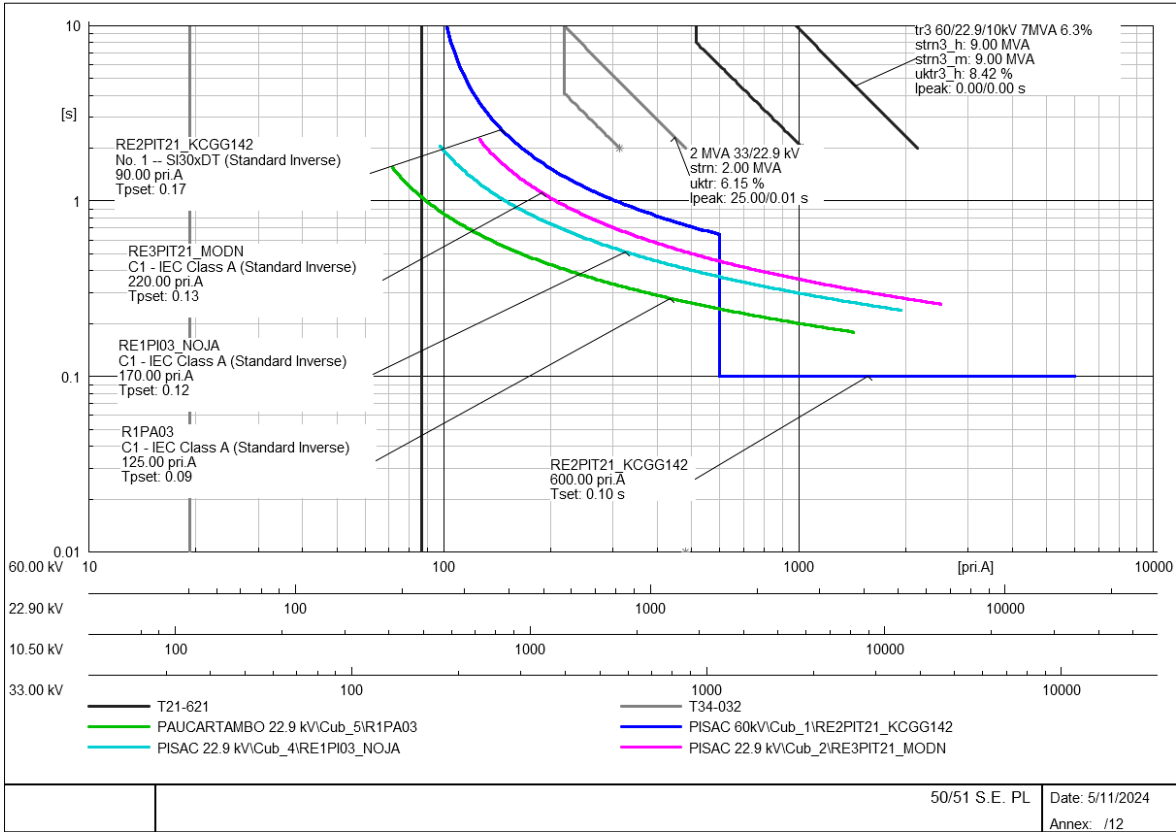
de 33 kV. Estas curvas permiten asegurar la secuencia correcta de operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero.

La figura incluye las curvas de los relés RE1PA03 (22.9 kV, en color amarillo), REL3303 (33 kV, en color azul) y RE PL-33 kV (en color verde). Todos los relés también están configurados con una curva de tiempo inverso estándar (IEC Class A).

Los ajustes de disparo son variados, con RE1PA03 en 2.50 sec.A y REL3303 en 3.40 sec.A, lo que les permite coordinarse para operar en el orden correcto.

Se observa que el relé en 22.9 kV actúa primero, seguido por los de 33 kV, asegurando así la selectividad en la protección del sistema.

**Figura 4.5. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección entre S.E. Paucartambo y S.E. Pisac.**



Fuente: Elaborado en base a simulaciones en DiGSILENT

Las Figura 4.5 muestra las curvas de coordinación de tiempo para la protección de sobrecorriente en la subestación de Paucartambo en nivel de 22.9 kV y con la protección de la subestación Pisac en 22.9 kV y en 60 kV que vendría a ser la protección del transformador de potencia de la S.E. Paucartambo. Estas curvas permiten asegurar la secuencia correcta de

operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero.

**Curva azul** (RE2PIT21\_KCGG142): Protección de Transformador de Potencia de S.E. Pisac en nivel de 60 kV

**Curva magenta** (RE2PIT21\_KCGG142 con ajuste adicional): Protección de la barra de 22.9 kV de la S.E. Pisac

**Curva verde** (RE1PI03\_NOJA): Protección del AMT PI03.

**Curva cian** (RE3PIT21\_MODN): Protección de la salida PA03 en S.E. Paucartambo, que suministra a la línea hacia Pillcopata

#### 4.3.3. S.E. Pillcopata - Protección 50N/51N Propuesto

La protección de sobrecorriente de fases 51N, se realiza tomando en consideración lo siguiente:

- Alimentador de MT : Entre el 25 al 40 % de la Máxima Demanda
- Transformador de potencia : Mayor al 30 % del TC
- Tiempo de coordinación entre 2 relés de protección: Mínimo 200 ms
- Para la línea de 33 kV : Mayor a 30 % del TC

La protección de sobrecorriente de fases 50N, se realiza tomando en consideración lo siguiente:

- Alimentador de MT : Despejar las fallas hasta el 80 % de la línea o alimentador ante fallas monofásicas.

**Tabla 4.3. Determinación de ajustes de protección de la protección 50N/51N en el área de influencia: S.E. Pisac, Paucartambo y Pillcopata**

| Código Equipo Protegido | Equipo Protegido |       |                    | Capacidad Equipo<br>A | Máxima Demanda |    | Protección Sobrecorriente Tierra |     | Observación |
|-------------------------|------------------|-------|--------------------|-----------------------|----------------|----|----------------------------------|-----|-------------|
|                         | kV               | TC    | Equipo             |                       | kW             | A  | Calculo corriente Io>            | 51N |             |
| PI-22                   | 22.9             | 200/1 | Barra 22.9 kV      | 176                   | 1943           | 49 | > 40 % I_Nom                     | 40  |             |
| PI03                    | 22.9             | 1/1   | AL. 3x70 A 22.9 kV | 255                   | 1818           | 45 | > 40 % I_Nom                     | 30  |             |
| PA03                    | 22.9             | 50/1  | T35-032 5 MW       | 126                   | 1161           | 30 | > 15 % x P_Nom                   | 25  |             |
| L-3303                  | 33               | 125/5 | AL. 3x90 A 33 kV   | 340                   | 1160           | 20 | > 40 % x 2 x P_Nom               | 20  |             |
| PL-33                   | 33               | 50/1  | T34-032 2 MW       | 35                    | 662            | 12 | > 1.3 x P_Nom                    | 18  |             |
| PL-01                   | 22.9             | 50/1  | AL. 3x50 A 22.9 kV | 210                   | 231            | 7  | > 1.5 x I_MD                     | 15  |             |
| PL-02                   | 22.9             | 50/1  | AL. 3x50 A 22.9 kV | 210                   | 429            | 12 | > 1.5 x I_MD                     | 15  |             |

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos y criterios de ajuste



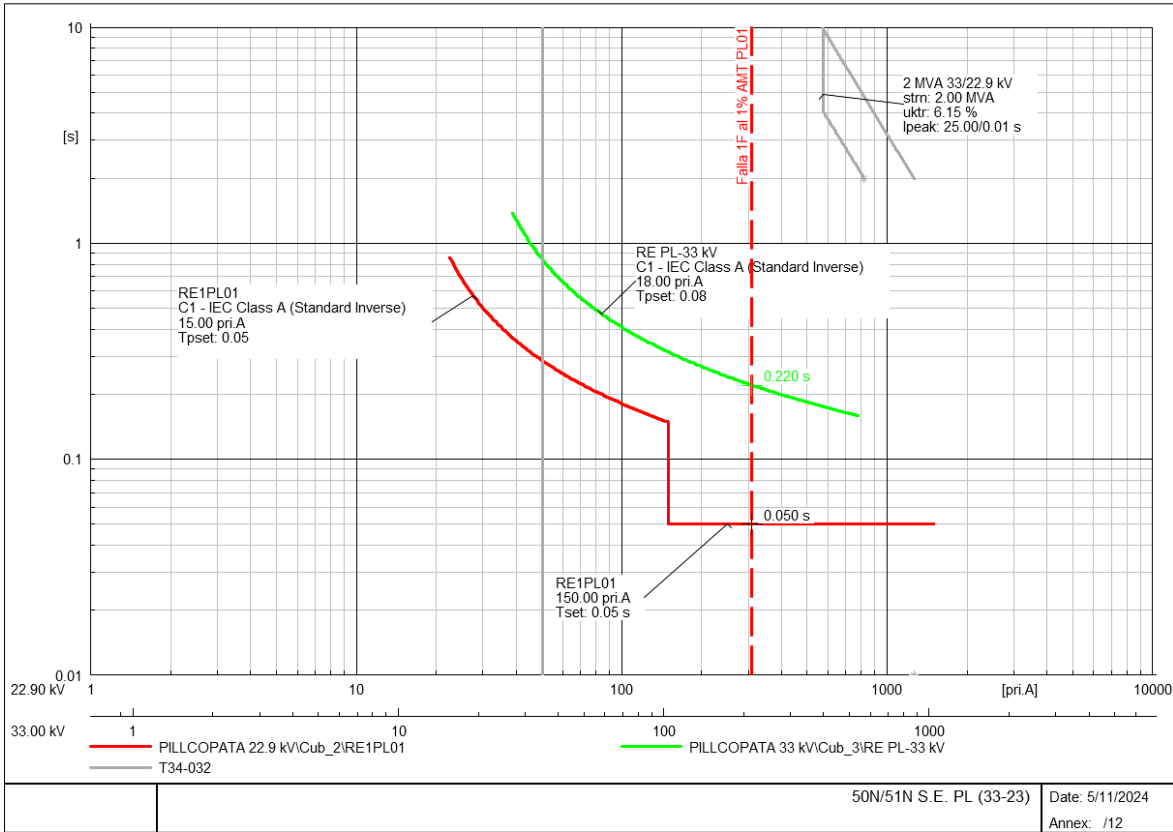
4.3.3.1. Ajustes Propuestos S.E. Pillcopata – Protección sobrecorriente 50N/51N

Tabla 4.4. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de tierra entre la S.E. Pillcopata, Paucartambo y Pisac

| S.E. Salvación – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |            |           |      |             |       |                      |        |      |        |                      |        |      |          |
|-------------------------------------------------------------|------------|-----------|------|-------------|-------|----------------------|--------|------|--------|----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                   | MARCA      | MODELO    | kV   | RTT         | RTC   | TIEMPO INVERSO (51N) |        |      |        | TIEMPO DEFINIDO(50N) |        |      | Recierre |
|                                                             |            |           |      |             |       | Io >                 |        | TMS  | Curva  | Io >>                |        | t >> |          |
|                                                             |            |           |      |             |       | A Sec                | A Prim |      |        | A Sec                | A Prim | (s)  |          |
| REPI23                                                      | ABB        | REX521    | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 200/1 | 0.20                 | 40     | 0.25 | IEC-SI | -                    | -      | -    |          |
| RE1PI03                                                     | Noja Nulec | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 1/1   | 30                   | 30     | 0.18 | IEC-SI | -                    | -      | -    | 2R+Lock  |
| RE1PA03                                                     | Noja Nulec | EVRC2A-NT | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 0.50                 | 25     | 0.20 | IEC-SI | -                    | -      | -    |          |
| REL3303                                                     | SEL        | SEL-351   | 33   | 33/0.1 kV   | 125/5 | 0.80                 | 20     | 0.09 | IEC-SI | -                    | -      | -    |          |
| REPL-33                                                     | SEL        | SEL-351   | 33   | 33/0.1 kV   | 50/1  | 0.36                 | 18     | 0.08 | IEC-SI | -                    | -      | -    |          |
| RE1PL01                                                     | SEL        | SEL-351   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 0.30                 | 15     | 0.05 | IEC-SI | 3.0                  | 150    | 0.05 | 2R+Lock  |
| RE1PL02                                                     | SEL        | SEL-351   | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1  | 0.30                 | 15     | 0.05 | IEC-SI | 3.0                  | 150    | 0.05 | 2R+Lock  |

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos y criterios de ajuste

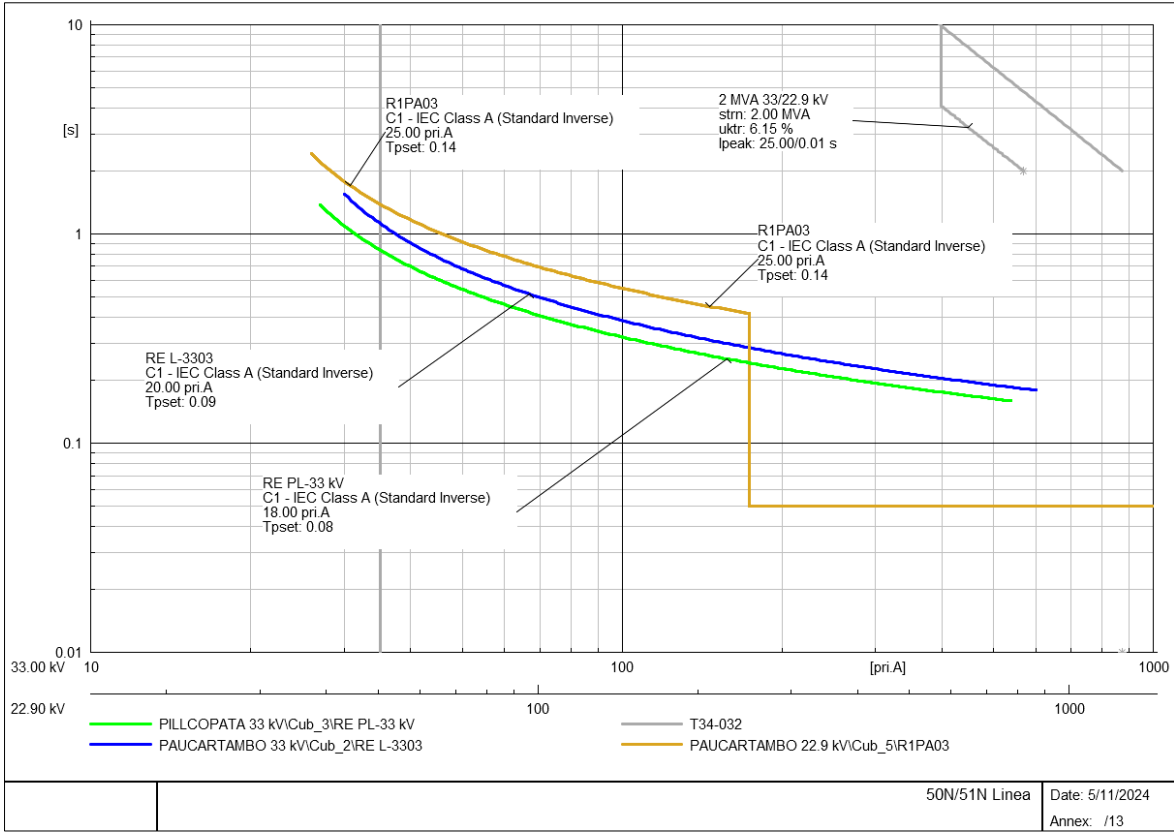
Figura 4.6. Ajustes Propuesto - Curva de coordinación de protección 50N/51N de la S.E. Pillcopata.



Fuente: Elaborado en base a las simulaciones en DIgSILENT

Las Figura 4.6 muestra las curvas de coordinación para la protección de sobrecorriente en la subestación de Pillcopata en nivel de 22.9 kV y 33 kV. Estas curvas permiten asegurar la secuencia correcta de operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero. Se muestra las curvas de operación para los relés RE1PL01 (22.9 kV, en color rojo) y RE PL-33 kV (en color verde). Ambos están configurados con una curva de tiempo inverso estándar (IEC Class A). Los valores de ajuste para el disparo y el tiempo (Tpset) son de 0.05 s en ambos casos, mientras que los valores de corriente de ajuste difieren, siendo 0.30 sec.A para el RE1PL01 y 0.36 sec.A para el RE PL-33 kV. Las curvas se presentan en una gráfica de tiempo (en segundos) vs. corriente primaria (en amperios), donde se observa que el relé en 22.9 kV actúa más rápido para corrientes menores, mientras que el de 33 kV tiene un mayor tiempo de retardo para coordinarse adecuadamente. El margen de coordinación es superior a 200 ms.

**Figura 4.7. Ajustes propuestos. Curva de coordinación de protección 51N. Entre la S.E. Paucartambo, Línea y S.E. Pillcopata.**



Fuente: Elaborado en base a simulaciones en DIgSILENT

Las Figura 4.7 muestra las curvas de coordinación de tiempo para la protección de sobrecorriente de tierra en la subestación Paucartambo, la línea y la subestación de Pillcopata

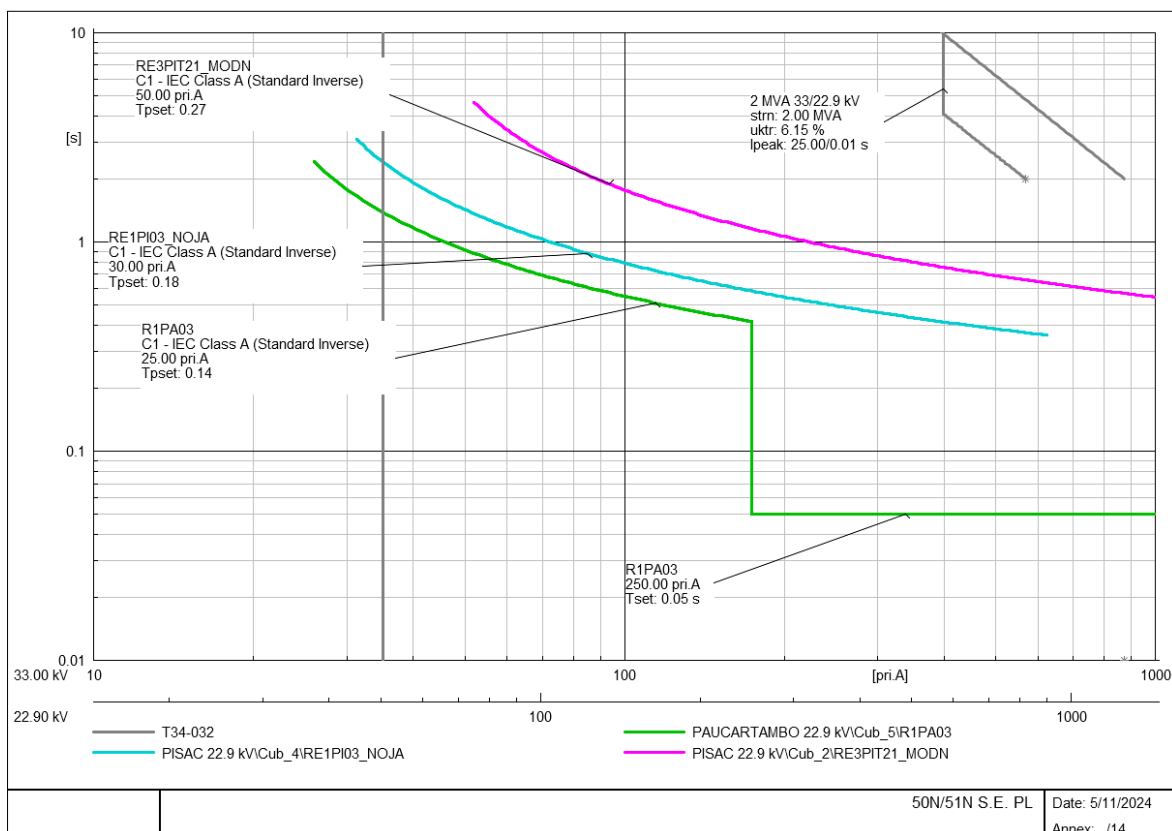
en nivel de 33 kV. Estas curvas permiten asegurar la secuencia correcta de operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero.

La figura incluye las curvas de los relés RE1PA03 (22.9 kV, en color amarillo), REL3303 (33 kV, en color azul) y RE PL-33 kV (en color verde). Todos los relés también están configurados con una curva de tiempo inverso estándar (IEC Class A).

Los ajustes de disparo son variados, con RE1PA03 en 0.50 sec.A y REL3303 en 0.80 sec.A, lo que les permite coordinarse para operar en el orden correcto.

Se observa que el relé en 22.9 kV actúa primero, aunque se observa que el margen de coordinación es pequeña, sin embargo esta se debe el transformador cuenta con devanado en delta en nivel de 33 kV, lo que no permite el paso de corrientes homopolares o corrientes de fallas a tierra, por lo que su coordinación no es afectada.

**Figura 4.8. Ajustes propuestos 51N. Curva de coordinación de protección entre S.E. Paucartambo y S.E. Pisac.**



Fuente: Elaborado en base a simulaciones en DiGSILENT

Las Figura 4.8 muestra las curvas de coordinación de tiempo para la protección de sobrecorriente en la subestación de Paucartambo en nivel de 22.9 kV y con la protección de la subestación Pisac en 22.9 kV que vendría a ser la protección del transformador de potencia de la S.E. Paucartambo. Estas curvas permiten asegurar la secuencia correcta de operación entre los distintos relés, garantizando que el dispositivo más cercano al fallo actúe primero.

**Curva magenta** (RE2PIT21\_KCGG142 con ajuste adicional): Protección de la barra de 22.9 kV de la S.E. Pisac

**Curva verde** (RE1PI03\_NOJA): Protección del AMT PI03.

**Curva cian** (RE3PIT21\_MODN): Protección de la salida PA03 en S.E. Paucartambo, que suministra a la línea hacia Pillcopata.

#### 4.3.4. S.E. Salvación - Protección 50/51 y 50N/51N Propuesto

**Tabla 4.5. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de fases S.E. Salvación**

| S.E. Salvación – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |       |         |      |             |      |                     |        |     |        |                      |        |      |          |
|-------------------------------------------------------------|-------|---------|------|-------------|------|---------------------|--------|-----|--------|----------------------|--------|------|----------|
| COD.<br>RELE                                                | MARCA | MODELO  | kV   | RTT         | RTC  | TIEMPO INVERSO (51) |        |     |        | TIEMPO DEFINIDO (50) |        |      | Recierre |
|                                                             |       |         |      |             |      | I >                 |        | TMS | Curva  | I >>                 |        | t >> |          |
|                                                             |       |         |      |             |      | A Sec               | A Prim |     |        | A Sec                | A Prim | (s)  |          |
| RE1SA01                                                     | SEL   | SEL-351 | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1 | 0.4                 | 20     | 0.5 | IEC-SI | 3.8                  | 190    | 0.05 | 2R+Lock  |
| RE1SA02                                                     | SEL   | SEL-351 | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1 | 0.4                 | 20     | 0.5 | IEC-SI | 3.8                  | 190    | 0.05 | 2R+Lock  |

Fuente: Elaboración propia. Ajustes similares a S.E. Pillcopata

**Tabla 4.6. Ajustes propuestos. Protección de sobrecorriente de tierra S.E. Salvación**

| S.E. Salvación – Sobrecorriente de fases – Ajustes actuales |       |         |      |             |      |                      |        |      |        |                      |        |      |          |
|-------------------------------------------------------------|-------|---------|------|-------------|------|----------------------|--------|------|--------|----------------------|--------|------|----------|
| COD. RELE                                                   | MARCA | MODELO  | kV   | RTT         | RTC  | TIEMPO INVERSO (51N) |        |      |        | TIEMPO DEFINIDO(50N) |        |      | Recierre |
|                                                             |       |         |      |             |      | Io >                 |        | TMS  | Curva  | Io >>                |        | τ >> |          |
|                                                             |       |         |      |             |      | A Sec                | A Prim |      |        | A Sec                | A Prim | (s)  |          |
| RE1SA01                                                     | SEL   | SEL-351 | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1 | 0.30                 | 15     | 0.05 | IEC-SI | 3.0                  | 150    | 0.05 | 2R+Lock  |
| RE1SA02                                                     | SEL   | SEL-351 | 22.9 | 22.9/0.1 kV | 50/1 | 0.30                 | 15     | 0.05 | IEC-SI | 3.0                  | 150    | 0.05 | 2R+Lock  |

Fuente: Elaboración propia. Ajustes similares a S.E. Pillcopata

## CONCLUSIONES

---

1. El estudio de coordinación de protección de la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación, con la inserción de la S.E. Pillcopata, ha logrado cumplir el objetivo de mejorar el funcionamiento del sistema de protección. A través de un análisis detallado y simulaciones específicas, se definieron ajustes óptimos para los dispositivos de protección, tanto en sobrecorriente de fase como de tierra, asegurando tiempos de actuación selectivos y coordinados.

La inclusión del transformador elevador en la S.E. Paucartambo y la actualización de los ajustes en las subestaciones involucradas permiten que el sistema responda de manera eficiente y precisa ante posibles fallas, minimizando tiempos de despeje y evitando desconexiones innecesarias.

2. La descripción, análisis y evaluación del sistema eléctrico actual y su coordinación de protección han permitido identificar las fortalezas y debilidades de los dispositivos de protección existentes. La configuración de la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación y la futura incorporación de la S.E. Pillcopata requieren un replanteamiento de ajustes para adaptarse a las nuevas condiciones operativas. El análisis ha evidenciado limitaciones en la capacidad actual de detección y despeje de fallas, destacando la necesidad de ajustes para garantizar una respuesta más precisa y confiable del sistema. Los resultados obtenidos constituyen una base sólida para optimizar los ajustes y estrategias de protección ante los cambios en la red.
3. La propuesta de nuevos ajustes de protección para la línea L-3303, en 33 kV Paucartambo – Salvación, considerando la inserción de la S.E. Pillcopata, ha optimizado la configuración de protección en la red. Las simulaciones realizadas validaron que estos ajustes mejoran la coordinación y tiempos de despeje ante fallas, permitiendo una respuesta más rápida y precisa del sistema. Estos resultados confirman que los ajustes propuestos contribuyen significativamente a la seguridad y eficiencia operativa del sistema eléctrico en esta área.

## RECOMENDACIONES

---

1. El presente estudio ha evidenciado que la conexión de la línea L-3303, en 33 kV y la nueva S.E. Pillcopata introduce dispositivos adicionales de protección que impactan en la coordinación global de la protección debido a la configuración radial de la red. Para mejorar la selectividad y coordinación de las protecciones en este contexto, se recomienda ajustar los umbrales de protección en la S.E. Pisac, específicamente en la barra de 22.9 kV. Se sugiere modificar el TMS de los relés de protección, aumentando el ajuste de 0.12 a 0.13, lo cual permitirá una respuesta más controlada ante fallas en las zonas aguas abajo sin comprometer la actuación del sistema en Pisac.
2. Se recomienda incrementar la corriente de arranque del alimentador PI03 de 80 a 120 A. Este ajuste permitirá una mayor tolerancia en condiciones de operación normales y garantizará que los relés respondan adecuadamente en caso de sobrecorriente o falla real en la línea L-3303, en 33 kV. Esta configuración optimizada mejorará la coordinación entre dispositivos y permitirá que el sistema de protección actúe de manera más eficaz y selectiva ante contingencias.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Anderson, P. M., Henville, C., Rifaat, R., Johnson, B., & Meliopoulos, S. (2022). *Power System Protection* (Second ed.). Wiley.
- Blackburn, J. L., & Domin, T. J. (2007). *Protective Relaying: Principles and Applications* (Third ed.). CRC Press.
- CLEAN TECHNOLOGY SAC, A. y. (Marzo 2015). *Declaración De Impacto Ambiental Del Proyecto: Mejoramiento Y Ampliación Del Sistema De Electrificación Rural De La Provincia Del Manu - Madre De Dios*. Lima, San Borja.
- COES SINAC. (Julio 2018). *Criterios De Ajuste Y Coordinación De Los Sistemas De Protección Del SEIN*.
- COES SINAC. (Julio 2018). *Requisitos Mínimos Para Los Sistemas De Protección Del SEIN*.
- Dr. Marroquín Peña, R. (2012). *Presentación: Metodología de la Investigación*. Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.
- Duncan, J., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2017). *Power System Analysis & Design* (Sixth ed.). Gengage Learning.
- EdP Estudios S.A.C. (Diciembre, 2017). *ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN A NIVEL EMPRESARIAL: Cachimayo – Urubamba – Pisac – Paucartambo*. EDP-ES-026-17/Anexo C.
- GRID ALSTOM. (2011). *Network Protection & Automation Guide, Protective Relays, Measurement & Control*. May.
- RAMIREZ CASTANO, J. S. (2003). *Protección de Sistemas Eléctricos*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Manizales.

SAADI JOEL, J. R. (2005). *Metodología Para la Estimación de Pérdidas Técnicas en Una Red de Distribución de Energía Eléctrica*. Lima - Perú.

A. Guzman, Bai-Lin Qin. SEL Inc.

Reliable Busbar Protection with Advance Zone Selection

Stanley E. Zocholl. SEL Inc.

Ratings CTs for Low Impedance Bus and Machine Differential Relays Applications

Z. Gajiè, B. Hilltròm, F. Mekiè. ABB Inc.

HV Shunt Reactor Secrets for Protection Engineers

G. Brunello, B. Kasztenny, C. Wester. GE Multilin

Shunt Capacitor Bank Fundamentals and Protection

ANSI/IEEE C37.113

Guide for Protective Relay Applicatiuons to Transmission Lines

G. Benmouyal, D. Hou, D.A. Tziouvaras. SEL Inc.

Zeo-setting Power-Swing Blocking Protection

D.A. Tziouvaras, H. Altuve, G. Benmouyal, J. Roberts. SEL Inc.

Line Differential Protection with an Enhanced Characteristic



## **ANEXOS**

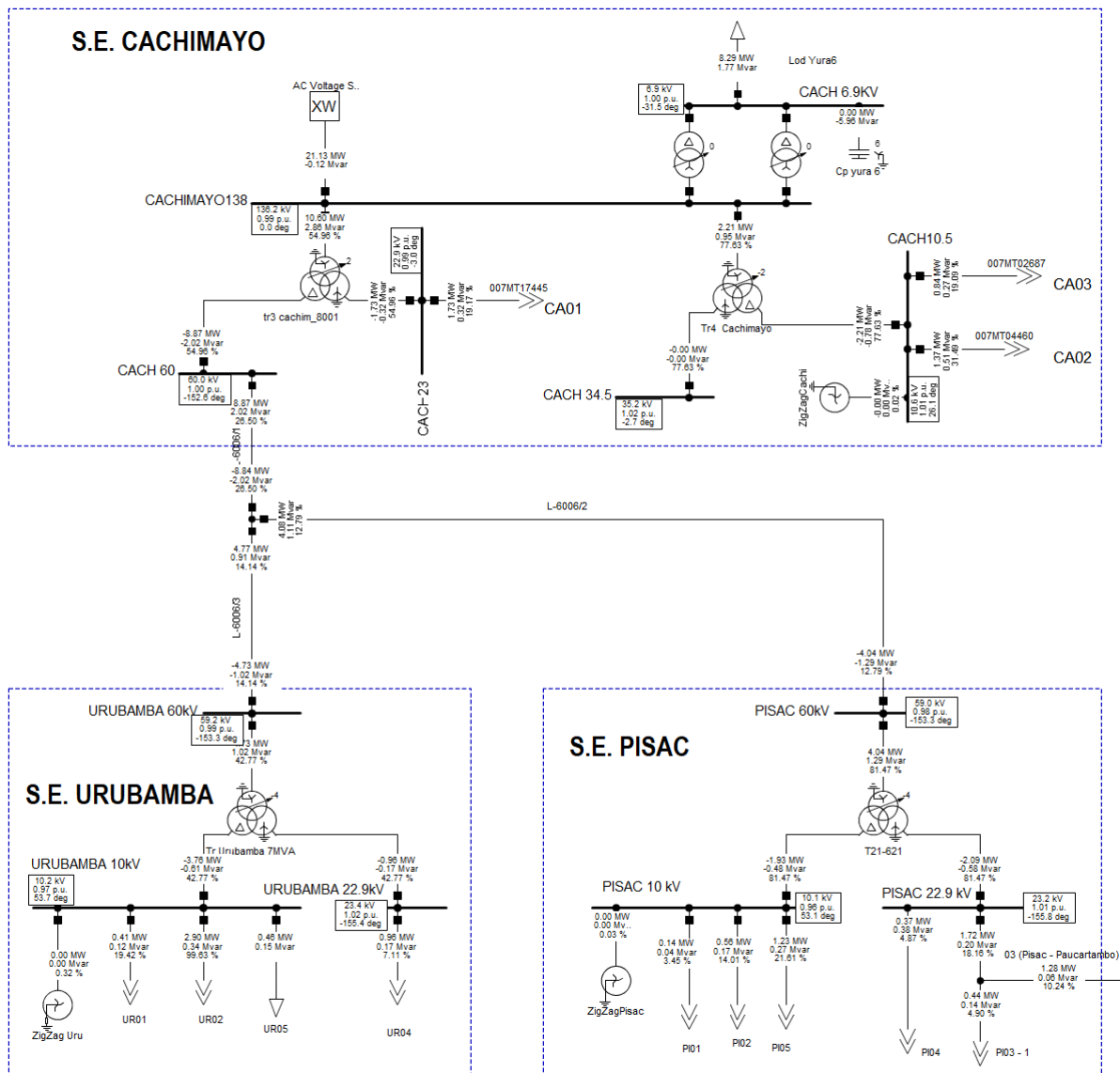
---

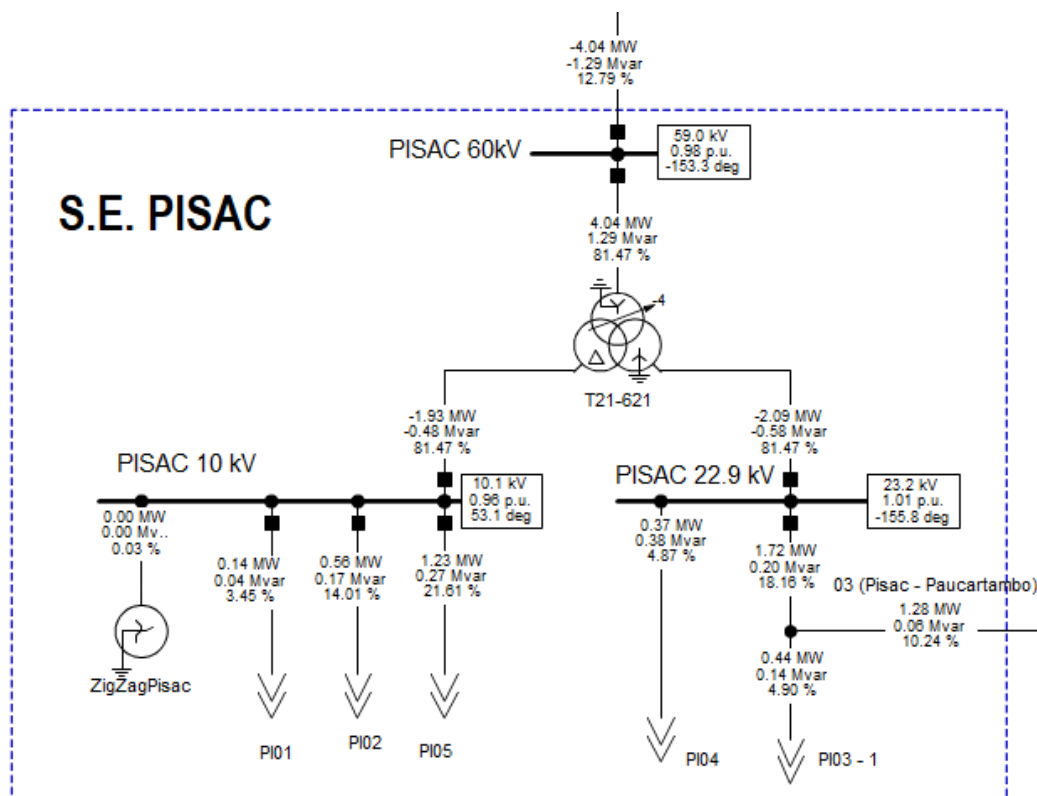
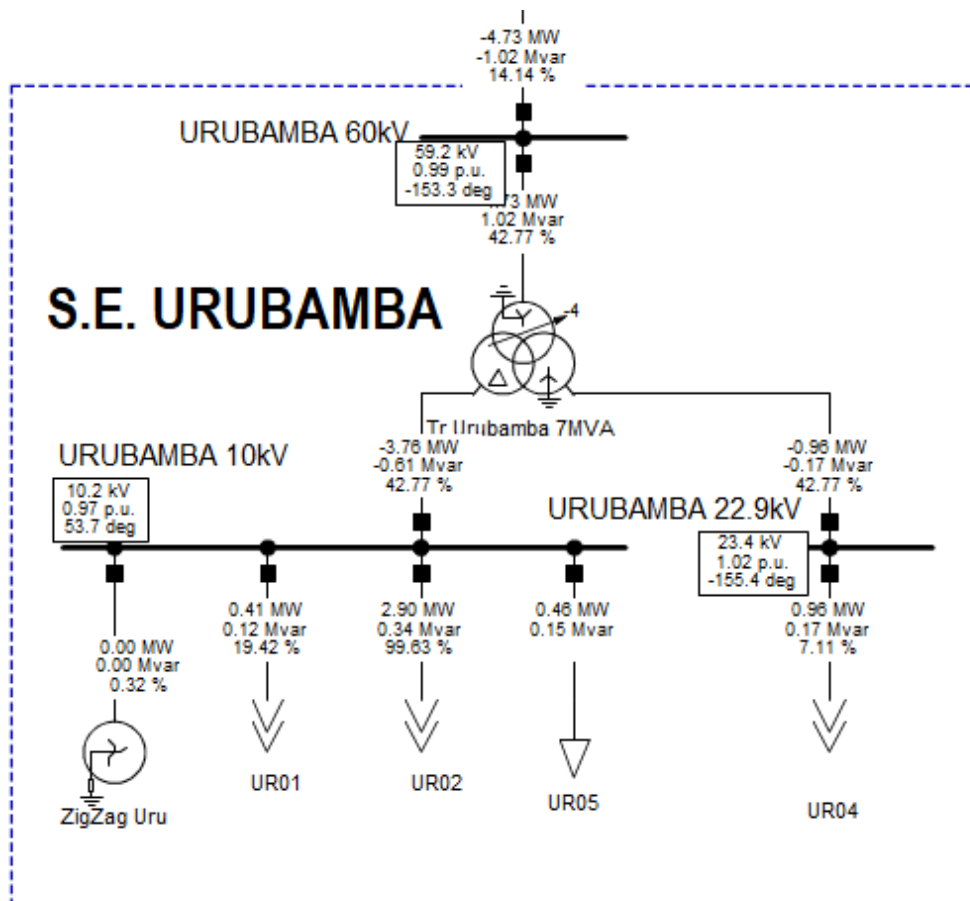
## A.1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

**TITULO:** Coordinación de protección de la línea L-3303 en 33 kv Paucartambo - Salvación con la inserción de la subestación Pillcopata 2024

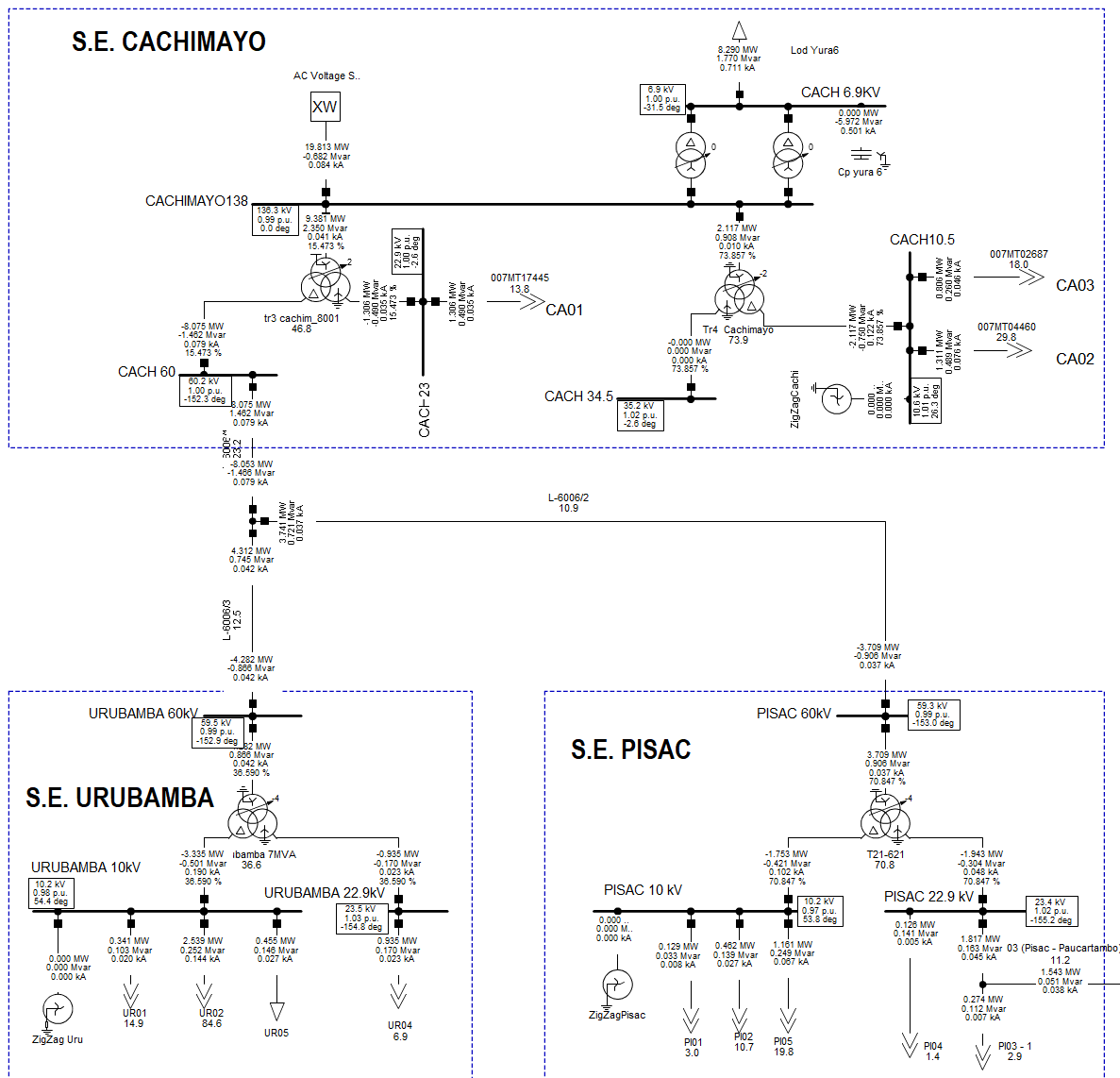
| Planteamiento del problema general                                                                                                                                                                                                                 | Planteamiento del objetivo general                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Planteamiento la hipótesis general                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Dimensiones                                                                                                                                                                                                          | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ¿Cómo garantizar la correcta operación y confiabilidad del sistema eléctrico mediante un estudio de coordinación de protecciones para la línea L-3303 en 33 kV (Paucartambo – Salvación) ante la inclusión de la Subestación Eléctrica Pillcopata? | Evaluar y optimizar la coordinación de protecciones en la línea L-3303 a 33 kV (Paucartambo – Salvación) mediante un estudio técnico que incorpore el impacto de la Subestación Eléctrica Pillcopata, con el objetivo de garantizar la selectividad, confiabilidad y eficacia del sistema de protección.               | El estudio de coordinación de protecciones para la línea L-3303 a 33 kV (Paucartambo – Salvación), que incorpore la Subestación Eléctrica Pillcopata, optimizará la operación y confiabilidad del sistema eléctrico, garantizando la selectividad, confiabilidad y eficacia en la respuesta ante fallas.                                                                                                                        | <b>Variable Independiente:</b><br>Inserción de la subestación<br><b>Indicadores:</b><br>-Topología de la red<br>-Demanda (MW)<br>-Potencia de Cortocircuito (MVA)                                                    | La investigación es de tipo aplicada nivel explicativo<br>Para la recolección de datos se emplean tres técnicas principales: recopilación documental (normas, manuales y estudios técnicos), análisis de diagramas eléctricos (para modelar el sistema y detectar puntos críticos), y simulación computacional (con Power Factory DlgSILENT) que permite evaluar el sistema bajo diferentes escenarios operativos.<br>El procesamiento de datos se realiza con herramientas informáticas como Power Factory DlgSILENT, AutoCAD, Microsoft Word y Microsoft Visio |
| Planteamiento del problema específico                                                                                                                                                                                                              | Planteamiento del objetivo específico                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Planteamiento hipótesis específicos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ¿Cuál es el desempeño actual del sistema eléctrico, considerando su configuración y los ajustes de coordinación de protección existentes?                                                                                                          | Analizar el estado actual del sistema eléctrico, incluyendo la configuración existente y la coordinación de protecciones, para identificar deficiencias y oportunidades de mejora.                                                                                                                                     | El análisis del estado actual del sistema eléctrico y de la coordinación de protecciones permitirá identificar deficiencias en la configuración existente, estableciendo una base técnica sólida para su mejora.                                                                                                                                                                                                                | <b>Variable Dependiente:</b><br>Coordinación de Protección<br><b>Indicadores:</b><br>-Selectividad (Tiempo y corriente de ajuste (S, A))<br>-Sensibilidad (Corriente mínimo ajuste, A)<br>-Seguridad (Actúa: Si, No) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| ¿Qué ajustes de protección son necesarios para la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo - Salvación, con la incorporación de la Subestación Eléctrica Pillcopata, ¿y cómo validar su efectividad mediante simulaciones?                                | Proponer ajustes de protección para la línea L-3303 en 33 kV Paucartambo – Salvación, por la inserción de la S.E. Pillcopata y verificar su desempeño a través de simulaciones. Y Validar los ajustes propuestos mediante simulaciones técnicas que evalúen su desempeño en escenarios de operación de máxima demanda. | La propuesta de ajustes de protección considerando la integración de la Subestación Eléctrica Pillcopata optimizará la coordinación de protecciones, garantizando la desconexión selectiva y oportuna ante contingencias. La validación de los ajustes propuestos mediante simulaciones demostrará su efectividad en escenarios de máxima demanda, mejorando el desempeño operativo y reduciendo los riesgos asociados a fallas |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

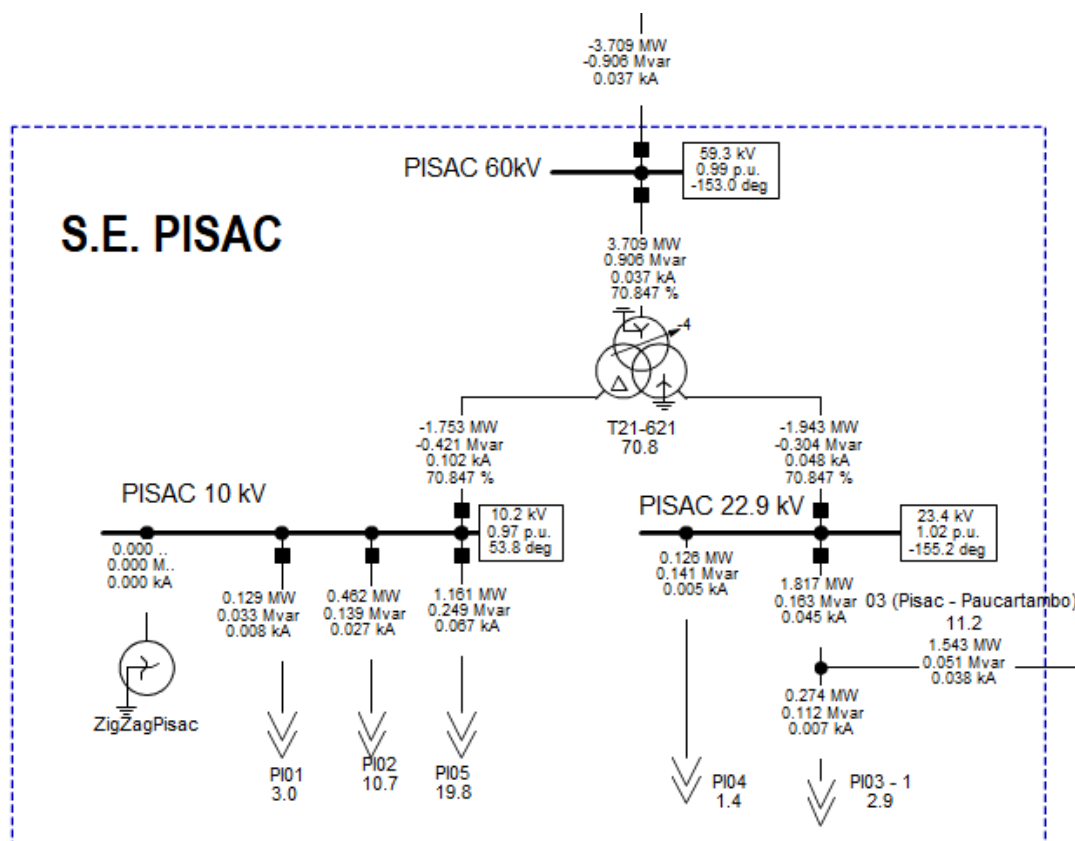
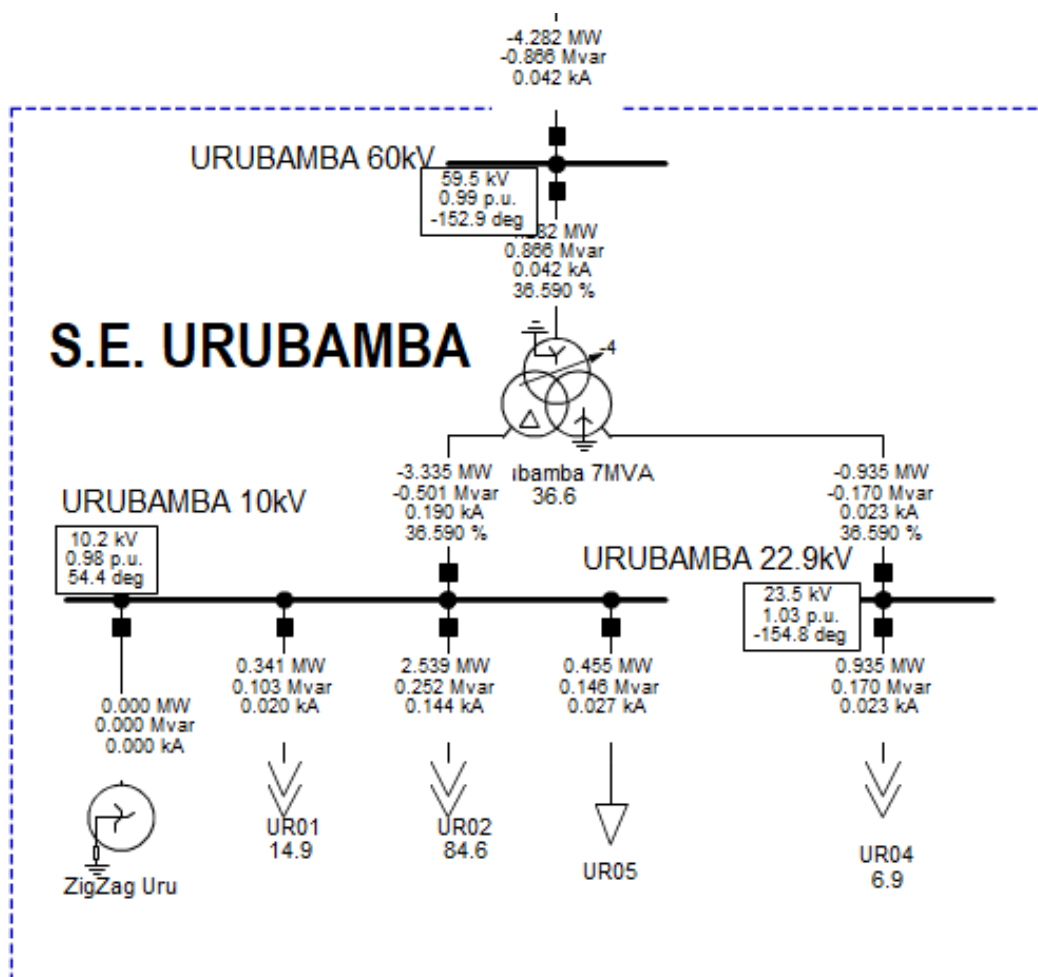
## A.2. SIMULACION FLUJO DE CARGA SEIN – RED ACTUAL



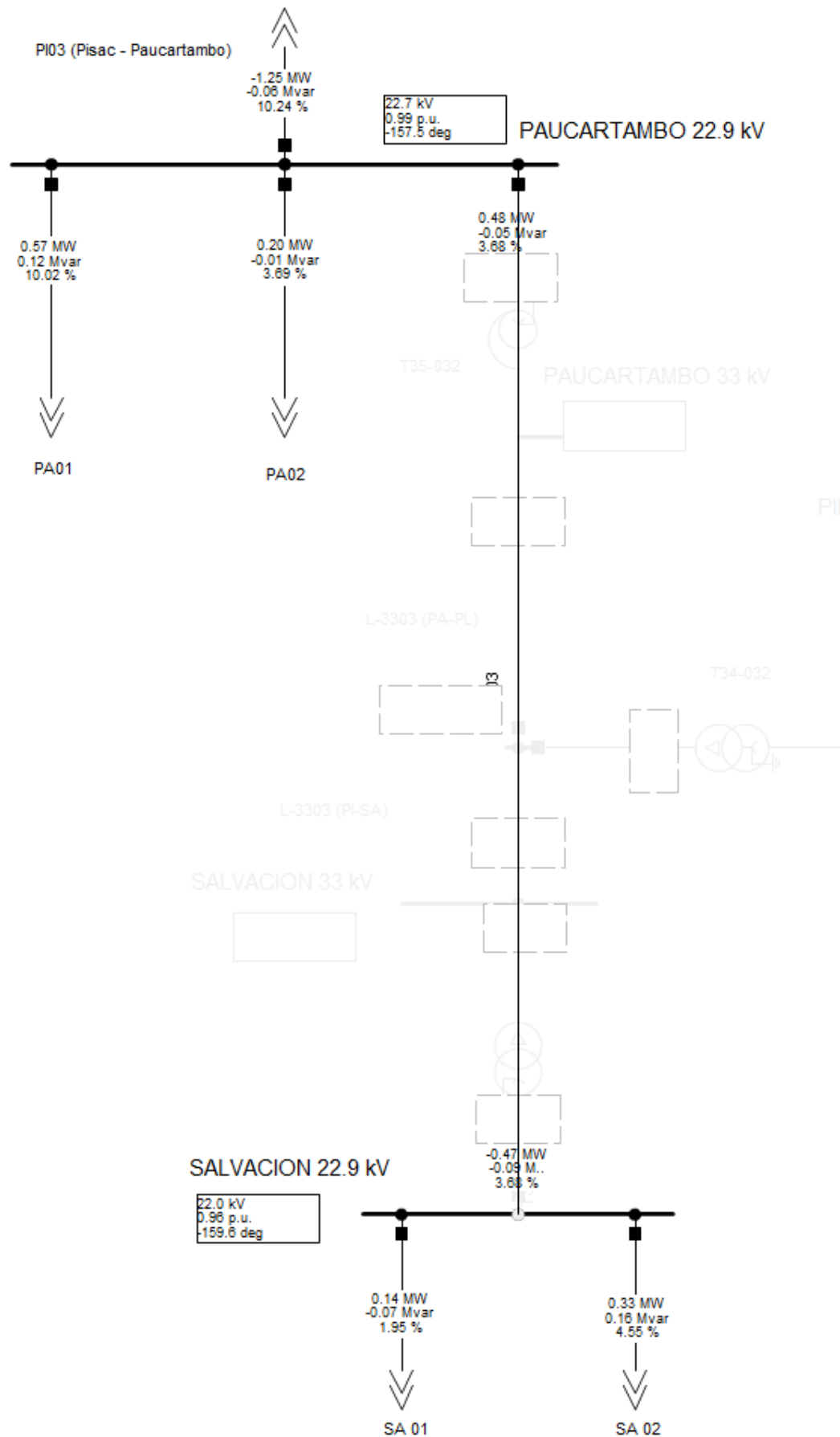


### A.3. SIMULACION FLUJO DE CARGA SEIN – RED PROYECTADA

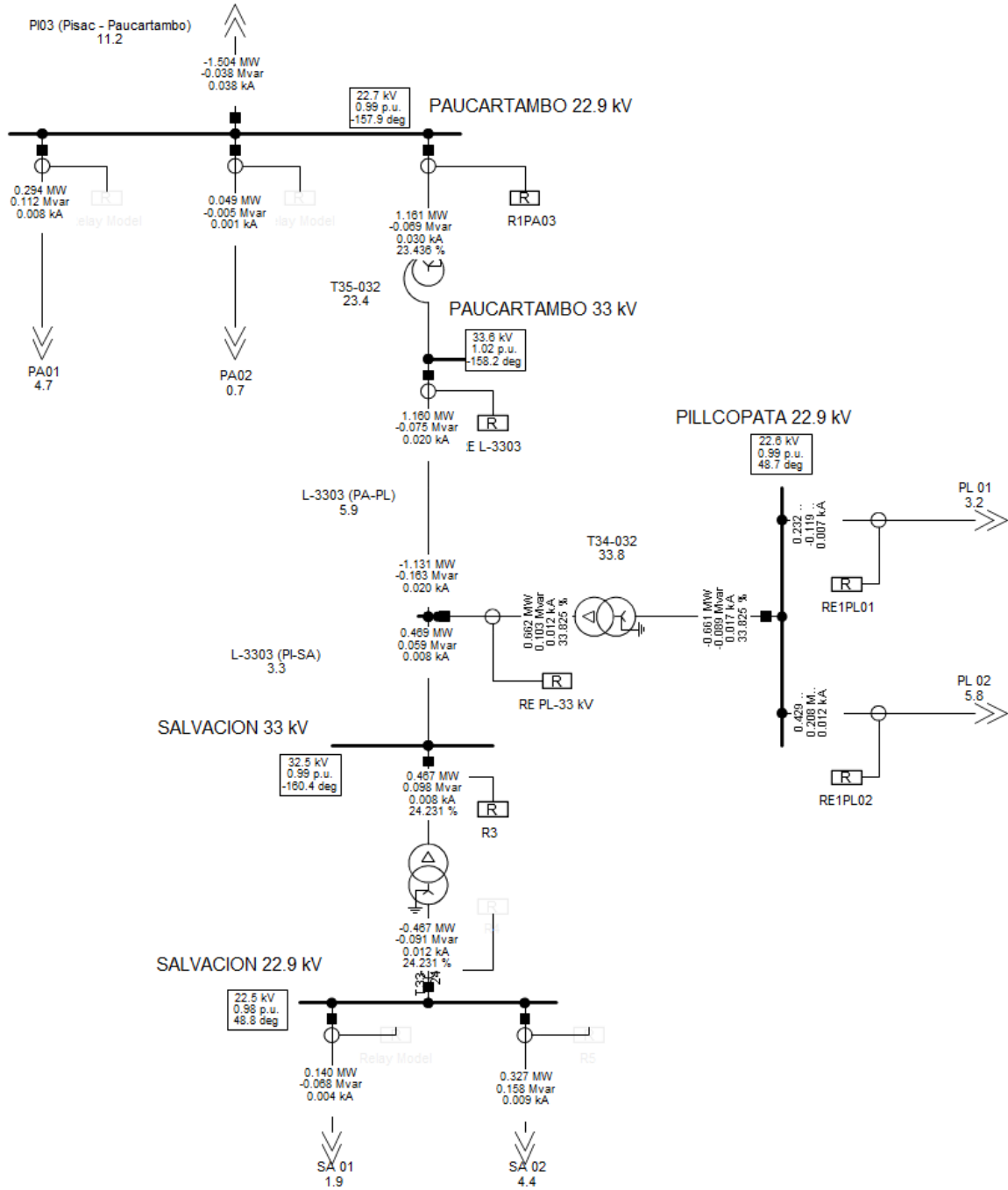




#### A.4. SIMULACION FLUJO DE CARGA MAXIMA DEMANA - RED ACTUAL

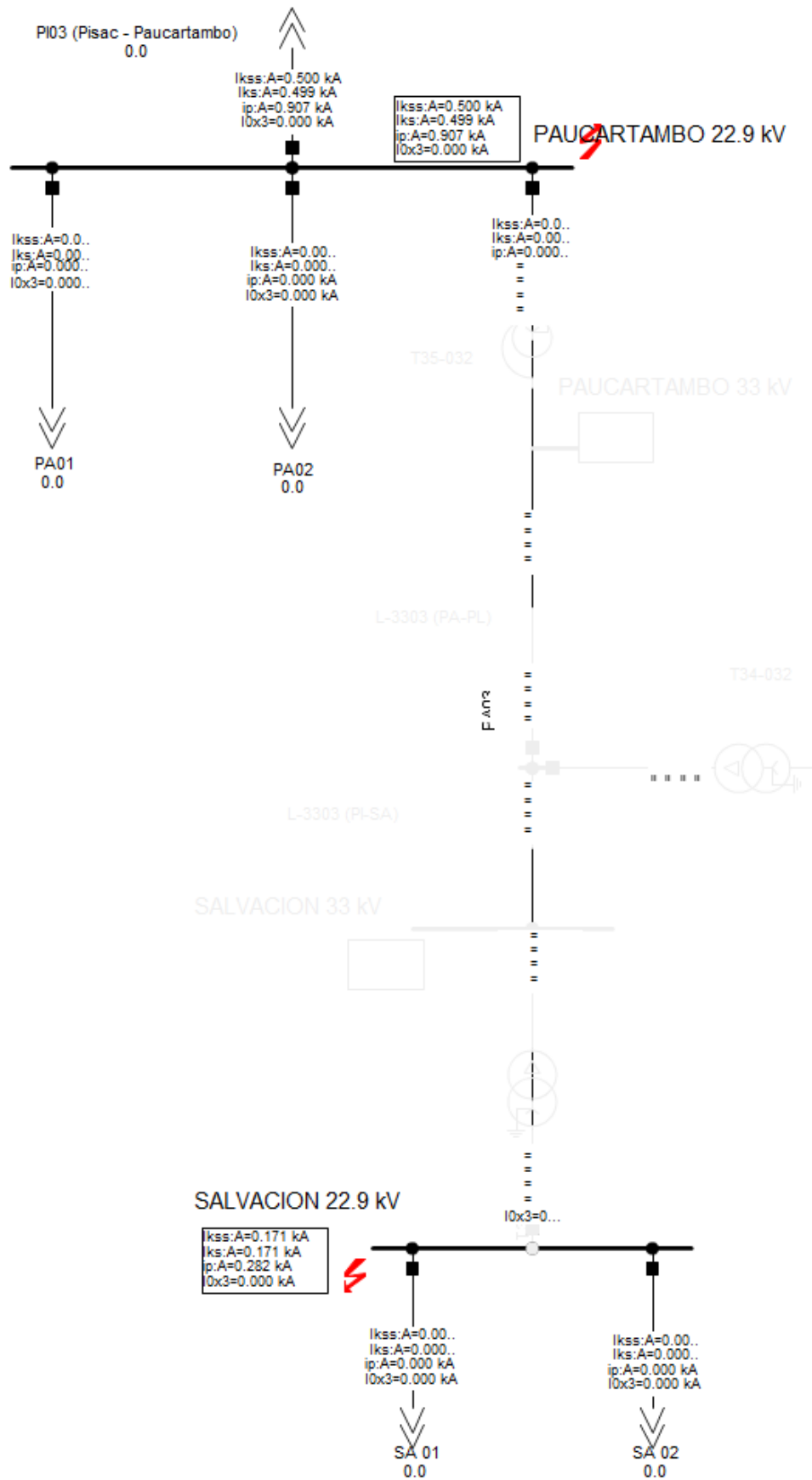


## A.5. SIMULACION FLUJO DE CARGA MAXIMA DEMANDA – RED PROYECTADA

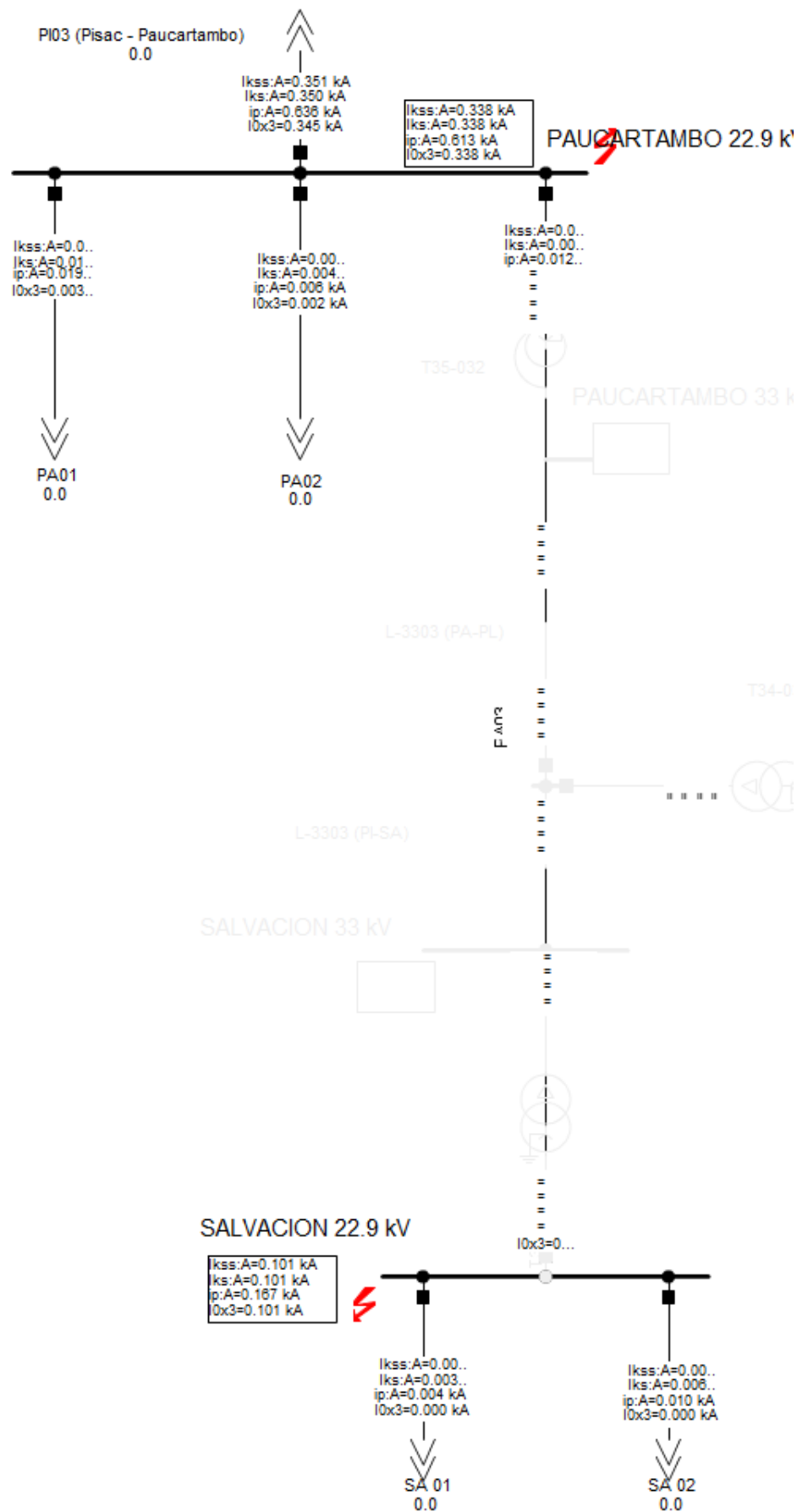




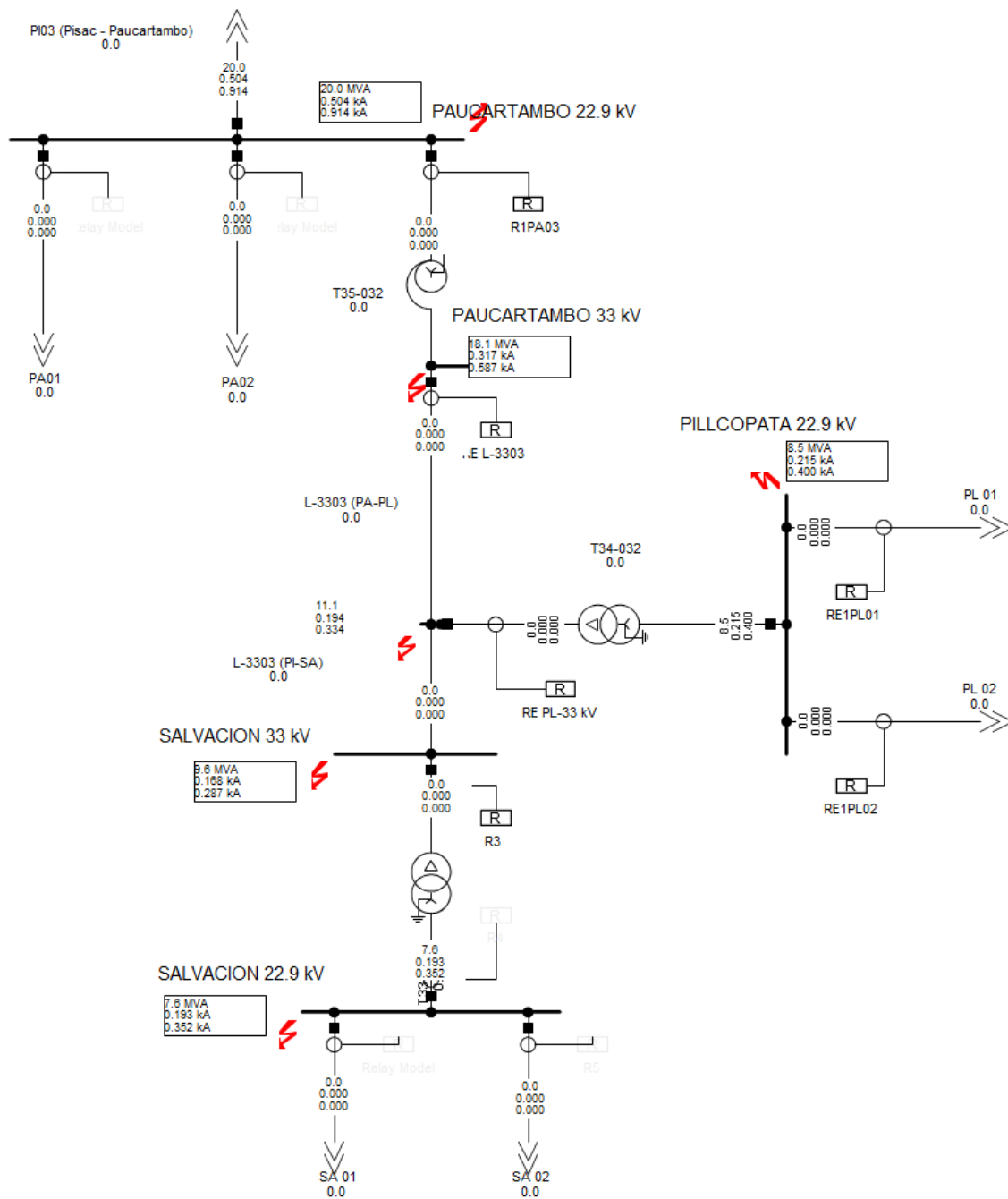
## A.6. SIMULACION CORTOCIRCUITO TRIFASICO – RED ACTUAL



## A.7. SIMULACION CORTOCIRCUITO MONOFASICO – RED ACTUAL



## A.8. SIMULACION CORTOCIRCUITO TRIFASICO – RED PROYECTADO



## A.9. SIMULACION CORTOCIRCUITO MONOFASICO – RED PROYECTADO

