



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN EN
CELDA DE MEDIA TENSIÓN CON MONITOREO SCADA EN
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ANGELINE DESIRE RONQUILLO ESCOBAR.

TUTOR: ING. ERVIN GEOVANNY SOLANO VILLEGAS, MSC.

Guayaquil-Ecuador

2022

**CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Yo, Angeline Desire Ronquillo Escobar con documento de identificación N°
0956372395 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de
manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 12 de marzo del año 2022

Atentamente,



Angeline Desire Ronquillo Escobar

0956372395

**CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**

Yo, Angeline Desire Ronquillo Escobar con documento de identificación No. 0956372395, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de investigación: “Diseño y Simulación De Un Sistema De Protección En Celdas De Media Tensión Con Monitoreo Scada En Subestaciones Eléctricas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 de marzo del año 2022

Atentamente,



Angeline Desire Ronquillo Escobar

0956372395

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ervin Geovanny Solano Villegas , con documento de identificación N° 0923481915, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN EN CELDAS DE MEDIA TENSIÓN CON MONITOREO SCADA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS”, realizado por Angeline Desire Ronquillo Escobar con documento de identificación N° 0956372395, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 12 de marzo del año 2022

Atentamente,



Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc

0923481915

DEDICATORIA

El trabajo de titulación se lo dedico con todo mi corazón y afecto a mis padres por el apoyo que he recibido durante mi trayecto como profesional, siempre impulsándome a ser mejor persona y otorgarme una visión positiva del mundo con valores de respeto, responsabilidad, empatía y sobre todo amor.

A mis mejores amigos Doménica, Beatriz, Ernesto y Víctor por darme luz e influir en mi camino de formación académica, brindándome apoyo incondicional y positivismo.

Por último, este proyecto me lo dedico a mí, por nunca dejar a un lado mis metas por más difícil que fuera la situación, por avanzar paso a paso sin dejarme vencer y seguir con convicción mis ideales.

Angeline Desire Ronquillo Escobar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme llegar a este día, ser mi guía a lo largo de mi camino y poder alcanzar una meta más a nivel profesional y personal.

A cada uno de mis familiares y amigos que me animaron a esforzarme día a día y me brindaron sus conocimientos, experiencias y consejos de vida.

A los autores de novelas y animaciones japonesas por brindarme felicidad al leer sus creaciones dándome las fuerzas para existir cada día.

Al Ingeniero Ervin Solano, por compartir su conocimiento, brindarme apoyo y ser una guía incondicional en el proceso del presente trabajo de titulación.

Finalmente agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por permitirme instruirme académicamente como ingeniera dentro de sus aulas en estos cinco años.

Gracias a todos

Angeline Desire Ronquillo Escobar

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se presenta el diseño del sistema de protección en base a un caso de análisis en una subestación eléctrica de distribución, dentro de celdas de media tensión se desarrolla una moderna configuración en cuanto control, protección, medición y comunicación con el fin de asegurar la correcta operación del SEP al usuario. Se presentan dos estudios: El primero basado en el diseño de la estructura interna del circuito con componentes que van a permitir realizar esta función, simulando el diagrama de control en operación continua del sistema, frente a la exposición de fallas eléctricas; por consiguiente, se realiza el diagrama de la red de comunicación scada para el control y supervisión de las celdas de media tensión, diseñando la arquitectura de comunicación y evaluando las señales de alerta y monitoreo de modo remoto. Los resultados indican el nivel de fiabilidad del modelo desarrollado ante el tiempo de respuesta frente a fallas eléctricas y la arquitectura de red para la comunicación remota al usuario.

ABSTRACT

This degree project presents the design of the protection system based on a case analysis in an electrical distribution substation, within medium voltage switchgear, a modern configuration is developed in terms of control, protection, metering and communication in order to ensure the correct operation of the SEP to the user. Two studies are presented: The first one based on the design of the internal structure of the circuit with components that are going to allow performing this function, simulating the control diagram in continuous operation of the system, facing the exposure of electrical faults; consequently, the diagram of the scada communication network for the control and supervision of the medium voltage switchgear is made, designing the communication architecture and evaluating the warning and monitoring signals in remote mode. The results indicate the reliability level of the developed model in terms of response time to electrical faults and the network architecture for remote communication to the user.

ACRONIMOS

- SEP** Sistema Eléctrico de Potencia
- MT** Media Tensión
- SCADA** Supervisión, Control y Adquisición de Datos
- IEEE** Institutos de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
- ANSI** Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
- ARCONEL** Agencia de Regulación y Control de Electricidad
- IEC** Comisión Electrónica Internacional
- NEC** Norma Ecuatoriana de la Construcción
- GIS** Celdas aisladas por gas
- AIS** Celdas con aislamiento de aire
- SF6** Hexafluoruro de azufre
- V** Voltaje
- I** Corriente
- VA** Voltio Amperio
- CT** Transformador de Corriente
- PT** Transformador de Potencial
- SEL** Laboratorios de Ingeniería Schweitzer
- DNP** Protocolo de Red Distribuida
- GPS** Sistema de Posicionamiento Global
- PLC** Controlador Lógico Programable
- RTAC** Controlador de Automatización en Tiempo Real
- RTU** Unidad Terminal Remota
- IED** Dispositivo Electrónico Inteligente

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
ACRONIMOS	ix
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE TABLAS.....	xvi
Introducción.....	1
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	3
1.1. Tema.....	3
1.2. Planteamiento del Problema.....	3
1.3. Formulación y Sistematización del Problema.....	3
1.3.1. Formulación del problema	3
1.3.2. Sistematización del problema	3
1.4. Justificación del Trabajo	4
1.5. Objetivos de la Investigación	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.6. Delimitación y Ubicación del Problema	5
1.6.1 Delimitación del Problema.....	5
1.6.2 Ubicación del Problema	5
1.7. Hipótesis.....	6

1.8. Situación Conflicto	6
1.9. Alcance.....	6
1.10. Metodología de la Investigación	6
1.11. Generación De Resultados	7
CAPÍTULO II MARCO TEORICO.....	8
2.1 Subestaciones eléctricas	8
2.1.1 Niveles de tensión	9
2.1.2 Componentes principales de las subestaciones eléctricas.....	9
2.2 Celdas de media tensión.....	9
2.2.1 Características de las celdas de media tensión.....	10
2.3 Sistemas de aislamiento en celdas de media tensión	11
2.3.1 Celdas con gas SF6	11
2.3.2 Celdas selladas al vacío	12
2.3.3 Celdas con aislamiento de aire.....	13
2.3.4 Celdas SafePlus.....	14
2.4 Celdas primarias y secundarias	15
2.4.1 Celdas primarias.....	15
2.4.2 Celdas secundarias	15
2.5 Tipos de celdas de media tensión.....	16
2.5.1 Celda con interruptor automático.....	16
2.5.2 Celda de protección con fusible	16
2.5.3 Celda de seccionamiento.....	17
2.5.4 Celda de remonte	18
2.5.5 Celda de medida.....	18
2.5.6 Celda de protección de transformador	19
2.6 Protección para media tensión	20
2.7 Sistemas de protección en subestaciones eléctricas	20

2.7.1	Dispositivos de protección	21
2.7.2	Fusibles	21
2.8	Relé de protección.....	22
2.8.1	Características de operación del relé de protección	22
2.9	Clasificación del relé según su función.....	23
2.9.1	Relés Electromecánicos	23
2.9.2	Relés Digitales	23
2.9.3	Relés Numéricos	24
2.10	Funciones de los relés para el sistema eléctrico (ANSI/IEEE)	25
2.10.1	Características de los parámetros del relé SEL 751	25
2.11	Coordinación de los sistemas de protección	27
2.11.1	ETAP	27
2.12	Sistema de comunicación SCADA en subestaciones eléctricas	28
2.12.1	Características del sistema SCADA	28
2.13	3 Protocolos de comunicación	29
2.13.1	Características del protocolo DNP3	29
2.13.2	Características del protocolo IEC-61850.....	30
2.14	4 Arquitectura SCADA	30
2.14.1	Rack de comunicaciones	31
2.14.2	Switch ethernet SEL 2730M	32
2.14.3	Módulo DPAC SEL 2440.....	33
2.14.4	GPS SEL 2488.....	33
2.14.5	RTAC SEL 3530	34
2.15	AcSELeRator RTAC	34
2.15.1	Características principales	35
CAPÍTULO III METODOLOGIA		36
3.1	Planteamiento del caso	36

3.1.1 Unifilar de la subestación eléctrica	36
3.1.2 Celdas de media tensión	37
3.1.3 Control de las celdas de media tensión	43
3.1.4 Ubicación de las celdas de media tensión	45
3.2 Simulación del sistema de protección	49
3.2.1 Coordinación de protecciones	50
3.2.2 Curva de operación.....	52
3.2.3 Simulación de fallas	53
3.2.4 Hoja de resultados	56
3.3 Sistema de comunicación SCADA.....	58
3.3.1 Arquitectura SCADA	58
3.3.2 Característica de los equipos de comunicación.....	59
3.3.3 Listado de señales lógicas	60
3.3.4 Interfaz de operación para la comunicación de dispositivos.....	61
CAPÍTULO IV ANALISIS DE RESULTADOS.....	63
4.1 Resultados constructivos de las celdas de media tensión	63
4.2 Resultado de la simulación del sistema de protección	64
4.3 Evaluación de la simulación de las fallas en el sistema	67
4.4 Evaluación de las señales de comunicación	68
CONCLUSIONES.....	70
RECOMENDACIONES	71
Bibliografía.....	72
Anexos.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del Problema	5
Figura 2: Vista Lateral de la Subestación Eléctrica	8
Figura 3: Celda de media tensión.....	10
Figura 4: Celda de media tensión encapsulada con gas SF ₆	12
Figura 5: Celda de media tensión sellada al vacío.....	13
Figura 6: Celda de media tensión con aislamiento de aire.....	14
Figura 7: Celda de media tensión SafePlus.....	15
Figura 8: Celda con interruptor automático	16
Figura 9: Celda de protección con fusible	17
Figura 10: Celda de seccionamiento	17
Figura 11: Celda de remonte.....	18
Figura 12: Celda de medida	19
Figura 13: Celda de protección de transformador.....	20
Figura 14: Fusible de protección.....	21
Figura 15: Relé de protección	22
Figura 16: Relé Electromecánico	23
Figura 17: Relé digital	24
Figura 18: Relé Numérico.....	24
Figura 19: Relé de sobre corriente SEL 751	26
Figura 20: Resumen de funciones SEL 751	27
Figura 21: Arquitectura de comunicación.....	31
Figura 22: Rack de comunicaciones	32
Figura 23: Switch ethernet SEL 2730M	33
Figura 24: Modulo DPAC SEL 2440.....	33
Figura 25: GPS SEL 2488	34
Figura 26: RTAC SEL 3530	34
Figura 27: RTAC SEL 3530	35
Figura 28: Diagrama Unifilar de la subestación eléctrica.....	37
Figura 29: Celdas de media tensión tipo SIMOSEC	39
Figura 30: Vista superior de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC	40

Figura 31: Diagrama unifilar de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC.....	44
Figura 32: Diagrama Unifilar de protecciones de la subestación eléctrica.....	45
Figura 33: Montaje junto a la pared celda de media tensión tipo SIMOSEC.....	46
Figura 34: Ubicación frontal de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC	47
Figura 35: Vista lateral derecha celdas de media tensión tipo SIMOSEC	48
Figura 36: Vista superior del cuarto de control	49
Figura 37: Simulación del sistema eléctrico	50
Figura 38: Curva de operación de la subestación eléctrica.....	51
Figura 39: Curva de operación de la subestación eléctrica.....	52
Figura 40: Falla en el bus 2.....	53
Figura 41: Reporte de operación caso 1	54
Figura 42: Falla bus 3-bus 10	55
Figura 43: Reporte de operación caso 2.....	56
Figura 44: Arquitectura SCADA	58
Figura 45: Tablero de comunicación	59
Figura 46: Configuración HMI del relé SEL 751	62
Figura 47: Puntos en la curva de operación	65
Figura 48: Puntos en la curva de operación ETAP	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Niveles de corriente en celdas primarias	15
Tabla 2: Niveles de corriente en celdas secundarias.....	15
Tabla 3: Sistema de media tensión.....	38
Tabla 4: Matriz de selección	38
Tabla 5: Distancias mínimas	40
Tabla 6: Apertura mínima de la puerta	41
Tabla 7: Datos técnicos de las celdas de media tensión.....	41
Tabla 8: Estándares de las celdas de media tensión.....	43
Tabla 9: Dimensiones del cuarto de equipos	46
Tabla 10: Dimensión de la instalación de las celdas.....	47
Tabla 11: Datos técnicos	57
Tabla 12: Señales lógicas.....	61
Tabla 13: Datos técnicos de las celdas de media tensión.....	63
Tabla 14: Datos de fabricación de las celdas de media tensión.....	63
Tabla 15: Datos de fabricación de las celdas de media tensión	64
Tabla 16: Puntos en la curva de operación	67
Tabla 17: Tiempo de disparo de IED´s de protección caso 1	67
Tabla 18: Tiempo de disparo de IED´s de protección caso 1	68
Tabla 19: funciones de fase máxima de sobrecorriente de tiempo	69
Tabla 20: funciones de sobrecorriente de tiempo en neutro	69

Introducción

Las celdas de media tensión son utilizadas en las subestaciones eléctricas como sistema de protección para la distribución de energía, se utiliza como uno de los principales equipos de protección y aislamiento en las subestaciones eléctricas de distribución que amplía en las redes eléctricas urbanas en la parte de salida de distribución de energía, dado a su rendimiento seguro y fiable, su rentabilidad y su estructura compacta. [1]

El sistema de protección es fundamental para que toda la planta de distribución cumpla su función de manera óptima en el caso de presentarse una anomalía, debe controlar, proteger y alertar fallas simultaneas, sobrecarga, corto circuito, si ocurre una falla en el sistema a tal magnitud que averíe la salida del equipo principal, se detendría la distribución de energía al usuario o cliente.

El tiempo de respuesta de una protección está relacionado directamente con la tecnología aplicada en su construcción y la velocidad en la que puede actuar el sistema operativo y de control de los interruptores automáticos que se enlaza de la misma forma.[2]

En la estructura interna del circuito de la celda de media tensión cuenta con componentes de protección, medición y corte para cumplir su función como sistema de protección se instala un relé de protección para eliminar y controlar las fallas en el menor tiempo posible considerando los factores de calidad y seguridad de la red eléctrica.

Mediante la simulación del sistema eléctrico se evalúan posibles casos donde se presentan fallas eléctricas que se pueden ocasionar en la red, aplicando el equipo de protección de la celda de media tensión y así demostrar la adecuada operación del equipo.

En el **capítulo I** se plantea todo lo relacionado a la problemática, al igual de exponer cada parte de desarrollo del problema y la información referente al propósito de la investigación, con el fin de lograr el objetivo establecido.

En el **capítulo II** se toma a consideración el marco teórico de todo lo que engloba la configuración de las celdas de media tensión, de este modo se hace más comprensible todas las características, funciones y componentes del objeto de estudio.

En el **capítulo III** se desarrollan las partes que contemplan el diseño y simulación por medio de los programas SIMARIS, autoCAD y ETAP, ejecutando la validación del sistema de protección en el trabajo de titulación, del mismo modo el ejemplo de casos que se consideran para evaluar el funcionamiento.

Además, se presenta la arquitectura SCADA de los dispositivos de comunicación que supervisan las señales de los equipos de protección dentro del sistema, se utiliza como referencia el programa AcSELerator RTAC que realiza la configuración del sistema SCADA para el monitoreo remoto.

Finalmente, en el **capítulo IV** se examinan los resultados del análisis del caso de estudio implementando el diseño del sistema de protección y de ser necesario resultados adicionales de interés que proporcionen mayores datos.

Acorde a lo mencionado con anterioridad, es de importancia considerar la existencia de información significativa, de diferentes equipos y características técnicas, en relación a las celdas de media tensión en el mercado y sus aplicaciones fundamentales, por consiguiente, este documento se focaliza en el análisis de información.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Tema

“Diseño y Simulación De Un Sistema De Protección En Celdas De Media Tensión Con Monitoreo Scada En Subestaciones Eléctricas”.

1.2. Planteamiento del Problema

Las subestaciones eléctricas de distribución en el SEP permiten modificar los niveles de tensión, internamente realizan operaciones de medición, protección, control y comunicación, por lo tanto, dependiendo del arreglo que se necesita implementar para la maniobra de distribución de energía, las celdas de media tensión son una opción ideal cuando se desea ubicar equipos de medición y control en el interior de la subestación.

Al suministrar energía, se monitorea constantemente el sistema, si se presentan fallas pueden causar pérdida de estabilidad en la red, teniendo como consecuencia desperfectos en los equipos o componentes fundamentales que ejecutan la distribución de energía, además de producir problemas de operación, se suman los costos elevados de reparación o mantenimiento correctivo fuera de la planificación del presupuesto.

Adicional a esto, el corte del suministro al cliente puede causar, un problema a nivel de producción, paro de actividades y accidentes que va a generar futuros problemas para la empresa a cargo del proyecto.

Se debe crear un diseño apropiado de un sistema de protección para proteger los equipos exteriores e interiores, las fallas que son prolongadas en el tiempo pueden causar daños a grande escala en los equipos por lo que se debe detectar y actuar en el sistema en un mínimo tiempo. [3]

1.3. Formulación y Sistematización del Problema

1.3.1. Formulación del problema

¿Con respecto a el análisis del diseño de la celda de media tensión se evaluará la operación del sistema de protección para la aplicación a futuro en subestaciones eléctricas de distribución?

1.3.2. Sistematización del problema

- ¿De qué manera beneficia el estudio del sistema de protección en celdas de media tensión para la implementación en subestaciones eléctricas?

- ¿Cómo se determina la fiabilidad de la utilización de un relé de protección dentro de las celdas de media tensión, a través de una simulación en el Software ETAP?
- ¿Durante el proceso de la elaboración del diseño de las celdas de media tensión, como se evalúa la comunicación de los equipos de control por medio sistema scada?

1.4. Justificación del Trabajo

En el actual estudio se analiza el diseño del sistema de protección de celdas de media tensión integrando el relé de protección dentro de su estructura para optimizar su función, evitar daños y prevenir costos elevados de mantenimiento o sustitución de equipos en la subestación eléctrica. El análisis indicado se basa en pruebas realizadas mediante la aplicación de programas validando el correcto funcionamiento y fiabilidad del diseño; consecuente a esto se detallará el caso de estudio donde se presentan las características adecuadas para el mejor uso, el cual se adaptará en las redes eléctricas para prevenir y evitar fallas.

Para realizar las pruebas de validación del estudio se tendrá de apoyo tres programas en el mercado para ejecutar el diseño y simulación de este proyecto.

1.5. Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de protección para celdas de media tensión ubicadas en subestaciones eléctricas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Plantear un caso de estudio ubicado en una subestación de distribución donde se localizan celdas de media tensión.
- Diseñar el unifilar de protección para celdas de media tensión en el software AutoCAD.
- Demostrar mediante la coordinación de protecciones la correcta operación del sistema desarrollado, utilizando el software ETAP.
- Desarrollar la arquitectura de red empleando el software AutoCAD para el monitoreo del estado de las celdas de media tensión.
- Analizar los resultados obtenidos del sistema de protección diseñados para el uso en celdas de media tensión.

1.6. Delimitación y Ubicación del Problema

1.6.1 Delimitación del Problema

Tema: “Diseño y Simulación De Un Sistema De Protección En Celdas De Media Tensión Con Monitoreo Scada En Subestaciones Eléctricas”

Temporal: Año 2021-2022.

Espacial: Universidad Salesiana, Sede Guayaquil, 2022

Objetivo de la Investigación: Desarrollar un sistema de protección para celdas de media tensión ubicadas en subestaciones eléctricas.

Campo Acción: Protecciones Eléctricas

Área: Ingeniería Eléctrica

1.6.2 Ubicación del Problema

El proyecto de investigación busca detallar una oferta técnica para el diagrama del sistema de protección y control en celdas de media tensión ubicadas en subestaciones eléctricas, al ser un proyecto que fundamenta su validación en simulación del diseño y coordinación de protecciones toma como referencia un circuito eléctrico de distribución basada en el libro “*Protective relaying*” de J. Lewis Blackburn y Thomas J. Domin [4].

El tiempo previsto para la realización de este proyecto se encuentra distribuido desde el mes de noviembre del 2021 hasta el mes de febrero del 2022.



Figura 1: Ubicación del Problema

Fuente: Revista “La guía del electricista”[39]

1.7. Hipótesis

El análisis del sistema de protección diseñado se va a someter a prueba, mediante un caso de estudio donde se presentan dos casos de análisis de falla eléctrica que tienen lugar en una subestación eléctricas en base al circuito de distribución señalado, demostrando la efectividad de la protección al momento de actuar aislando las anomalías y alertando al usuario.

1.8. Situación Conflicto

El conflicto se presenta al ser un estudio sin espacio y tiempo definido, tomando como referencia general el esquema de un caso de estudio de un sistema eléctrico en una subestación, creando una dificultad ya que el diseño de esta, puede variar dependiendo al lugar, espacio y a los equipos de patio requeridos por el cliente.

Además del aumento en el costo de reparación de equipos de patio, maniobra, control y medición por una falla eléctrica que pueda averiar los mismos, y se necesite realizar un mantenimiento correctivo o el reemplazo del equipo afectado en el sistema, provocando una suspensión temporal de la función en las que interviene la subestación eléctrica.

1.9. Alcance

Este proyecto de investigación se evaluará por medio de un caso de estudio en el cual, se determinará la confiabilidad del sistema de protección para ser implementado a futuro en subestaciones eléctricas bajo las especificaciones técnicas indicadas por el cliente.

1.10. Metodología de la Investigación

El desarrollo del sistema demanda un análisis detallado de cada componente utilizado para establecer adecuadamente el sistema de protección de las celdas de media tensión desde el punto de vista técnico.

En base a fundamentación teórica y propuesta se elige el modelo de las celdas con un soporte de especificaciones técnicas que se van a manejar en el diseño a su vez se realiza la coordinación de protecciones para elegir el relé en base a las características que requiera el cliente o los tipos de fallas que se puede ocurrir en el sistema eléctrico para cada clase de celda la estructura de los elementos internos varía, ya que la fachada externa es la misma.

Posteriormente al planteamiento del diseño, se ejecuta la coordinación de protecciones que evalúa la operación, la selectividad, y la aplicación de los componentes de protección en el sistema eléctrico. Esto da paso a la simulación donde se pueden analizar estos puntos en el software ETAP.

Con lo antes mencionado, se desea obtener un sistema práctico que sea puesto en operación para el controlar y resguardar la maniobra de distribución de energía, también, brindará estabilidad y mayor nivel de fiabilidad al realizar esta operación, para así optimizar la vida útil de los equipos y que los costos provenientes del mantenimiento sean mínimos.

La supervisión en un sistema de protección en subestaciones eléctricas es crucial en cuanto, al estado de funcionamiento de los equipos controladores de protección, para el usuario verificar que los equipos están funcionando acorde a los parámetros establecidos de protección se aplica el sistema de comunicación.

La comunicación se realiza interconectando los equipos controladores para recibir las señales de las redes e inspecciona el funcionamiento de estos, da la comodidad al cliente de una supervisión local o remota. Para ejecutar esta acción se crea una arquitectura de dispositivos que componen el hardware y son integrados para la supervisión mediante un software de comunicación.

Por esta razón, se menciona al software AcSELeRator RTAC como un ejemplo del programa que puede realizar la configuración del SCADA de los dispositivos de comunicación y los equipos de protección dentro de las celdas de media tensión.

Para el análisis del proyecto se utilizarán las tres metodologías a continuación:

- Diagnóstico: Es la investigación de información disponible en documentos técnicos del tema.
- Análisis de la información: Determinar las referencias teóricas para la comparación y simulaciones en software.
- Generación de resultados: La valoración de los resultados del proyecto, para plantear el sistema de protección idóneo.

1.11. Generación De Resultados

El resultado gracias a la información obtenida a través del estudio y las simulaciones se complementarán para establecer un sistema de protección funcional para la implementación futura en subestaciones eléctricas.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Subestaciones eléctricas

La subestación eléctrica tiene como finalidad transformar y fijar los niveles de tensión para la distribución y transmisión de energía. Estas, emplean varios equipos de maniobra, protección y medición tanto interiores como exteriores. La función fundamental de la subestación es alterar el voltaje en el sistema eléctrico desde la transmisión o subtransmisión a la distribución de la energía para un suministro local en sitios que estén alcance de los clientes. [5]

Dentro de la estructura de las subestaciones eléctricas, la ingeniería tiene diversas clases multidisciplinarias en el diseño[6]:

- Civil
- Mecánica
- Medio ambiente
- Eléctrica
- Comunicaciones

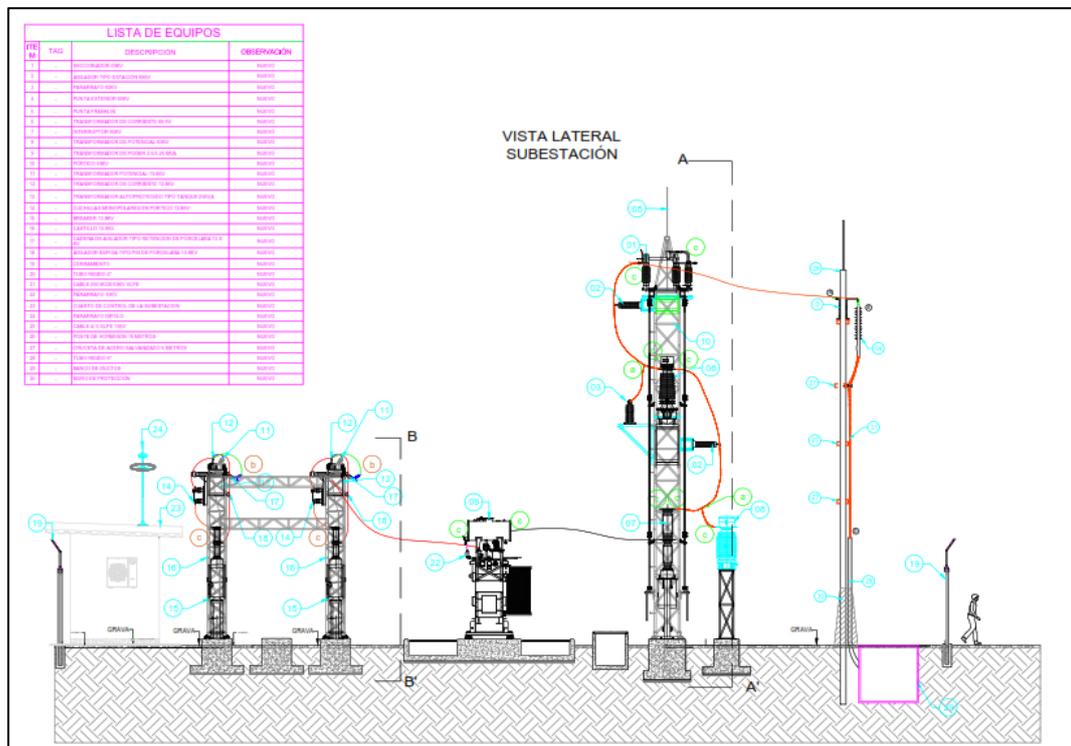


Figura 2: Vista Lateral de la Subestación Eléctrica

Fuente: Autor

2.1.1 Niveles de tensión

Los niveles de voltaje o tensión de las subestaciones eléctricas se pueden definir según la función que mantienen en el sistema eléctrico de potencia detallado por el ARCONEL, los niveles de voltaje o tensión que se maneja dentro del Ecuador se dividen por medio de grupos, baja tensión es menor o igual a 0,6 kV, media tensión en un rango de un voltaje superior a 0,6 y menor o igual a 40 kV, alta tensión grupo 1 en una categoría de un voltaje superior a 40 kV y menor o igual a 138 kV, alta tensión grupo 2 superior a 138 kV. [7]

2.1.2 Componentes principales de las subestaciones eléctricas

La subestación eléctrica se compone de un conjunto de equipos, dispositivos e instalaciones que tienen la misión de configurar los parámetros de energía eléctrica. Los elementos que componen las subestaciones eléctricas tienen una función por la cual desempeñan su trabajo de acuerdo a su ubicación dentro de la estructura, entre los principales componentes de las subestaciones eléctricas están[8]:

- Equipos de patio: Son los equipos que se ubican en el patio de conexiones en la intemperie tales como el transformador de poder, interruptor de potencia, seccionadores, transformadores de potencial, transformadores de corriente, aparta rayos, barras, etc.
- Equipos de control: Son los dispositivos que realizan las operaciones de control, medición y protección ubicados en el cuarto de control, tales como celdas de media tensión, relés de protección, controladores, reguladores de voltaje, etc.
- Equipos de comunicación: Son los encargados de supervisar el funcionamiento de la subestación eléctrica y de monitorear a los IED's de protección dentro del cuarto de control, de forma remota a la mano del usuario u operador por medio de un sistema SCADA, entre los equipos se incluyen: RTU, RTAC, inversor, Switch, etc.

2.2 Celdas de media tensión

La celda de media tensión es un equipo utilizado para la protección en sistemas eléctricos, con un conjunto de componentes que realizan la función de disparo y aislamiento en protección contra sobrecorriente.[9]

Los diversos equipos que forman el montaje de los centros de transformación son: Seccionadores, interruptores, barras, transformadores de medición y potencia; estos

elementos se acoplan dentro de los circuitos de las celdas agrupados por funciones con respecto a la protección. [10]

La aparatación convencional de conmutación convencional es fácilmente adaptable a la automatización, porque los requisitos implican una capacidad que la mayoría de estos dispositivos ya contienen: la de ser remotos, la posibilidad de disparar y cerrar a distancia. Sin embargo, con los equipos de control cada vez más versátiles a satisfacer al complejo sistema operativo.[9]



Figura 3: Celda de media tensión

Fuente: Libro “Desarrollo de redes eléctricas y centros de transformación”[11]

2.2.1 Características de las celdas de media tensión

Las celdas de media tensión en su metalmecánica compacta, incluye un conjunto de equipos de maniobra, mediante de compartimiento que integran el circuito principal, dentro de su estructura contiene una configuración completa para realizar la distribución de energía a distintos puntos requeridos. [11]

En su sistema enlaza la acometida con la línea de alimentación general, cuentan indicador por marca y tipo de fabricante con parámetros de energía, tensión nominal (V), intensidad nominal (A), frecuencia (Hz). [12]

Las celdas de media tensión en sus características constructivas, deben ser resistente, para sujetar los esfuerzos que se pueden producir por la instalación, transporte y operación, en su estructura serán construidas en planchas de acero galvanizado tratada y pintada,

todas las partes metálicas de la estructura deben estar conectadas de forma segura a la varilla de tierra. [13]

2.3 Sistemas de aislamiento en celdas de media tensión

2.3.1 Celdas con gas SF6

El hexafluoruro de azufre o también conocido como SF₆, es un gas incoloro, inodoro, no inflamable y no tóxico, gracias a sus características se lo utiliza como un medio dieléctrico como el principal líquido incorporado en dispositivos eléctricos. [14] El SF₆ se utiliza como gas aislante en subestaciones GIS, como aislante en las celdas MT, medio de enfriamiento usado en transformadores de poder y aislante para interruptores de media y alta tensión. [15]

Las aplicaciones de este, se emplean en sistemas cerrados y en el caso de los interruptores el SF₆ garantiza todas las funciones de aislamiento y disparo en el nivel de tensión indicado, de igual forma las propiedades del SF₆ permiten reutilizar el gas recuperado en nuevos procesos productivos. [15] Entre las características más importantes del elemento están [16]:

- Alta propiedad dieléctrica
- Capacidad de regeneración
- Importantes propiedades relevantes

Las celdas selladas en gas SF₆, son utilizadas por sus características como aislamiento en los compartimentos de las celdas cumpliendo los requisitos de los sistemas sellados a presión, sin la necesidad del tratamiento de gas en el tiempo de vida útil de las celdas. Adicional a eso, las condiciones ambientales no tienen efecto en el equipo de media tensión el cual está encapsulado en el compartimiento del gas SF₆, este dieléctrico reduce la probabilidad de fallas a comparación de las instalaciones que emplean aire como

aislante. [16] En la figura 4 se puede visualizar la vista lateral interna de una celda de media tensión con compartimientos sellados en SF₆.

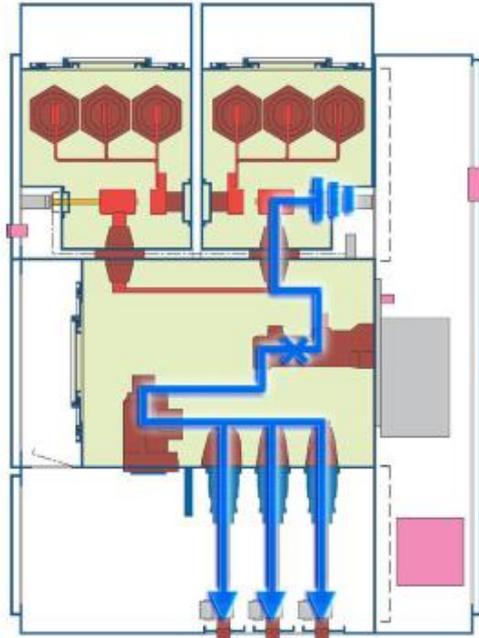


Figura 4: Celda de media tensión encapsulada con gas SF6
Fuente: Libro "Soluciones celdas GIS"[16]

2.3.2 Celdas selladas al vacío

Las celdas selladas al vacío se consideran ecológicas ya que son libre de SF6, poseen la capacidad de operar de manera adecuada en corrientes nominales de carga y corrientes de corto circuito, para incrementar el medio eléctrico se agrega un material encapsulado de resina epoxi. Las características fundamentales que se pueden valorar son[17]:

- Seguridad: Al poseer sistemas de detección de voltaje para la verificación del aislamiento.
- Confiabilidad: Diseño completo que cumple las normas IEC.
- Sustentables: Menor cantidad de elementos con un diseño ecológico libre de SF6 utilizando materiales reciclables.
- Libre de mantenimiento: Al ubicar las partes en un ambiente cerrado y resistente a efectos del medio ambiente.
- Bajo costo de instalación: No es necesario comprobar la presión del SF6, no tiene la necesidad de canal de arco externo.

Dentro de los compartimientos de las celdas, el elemento de protección principal sellado al vacío es el interruptor incorporando contactos auxiliares e indicadores mecánicos por medio de ventanas de inspección. [17]

En la figura 5 se logra distinguir la celda sellada al vacío en su división interna de los elementos.



Figura 5: Celda de media tensión sellada al vacío
Fuente: Catalogo “Celdas de media tensión” [18]

2.3.3 Celdas con aislamiento de aire

Las celdas de media tensión en su estructura metalmecánica está formada por divisiones de acero unidos, en la estructura se fijan dispositivos de seccionamiento y de puesta a tierra[18], la celda puede incorporar enclavamientos de seguridad apropiados entre los actuadores eléctricos del interruptor y seccionador, en el caso de las celdas AIS, los interruptores son tipo extraíbles suministrados con una bobina de cierre y dos bobinas de apertura, las cuales se pueden accionar por comandos locales o remotos.[13]

Entre las características que se presentan en las celdas AIS están[16]:

- Interruptor extraíble
- Las condiciones ambientales pueden afectar el aislamiento
- Puesta a tierra independiente

En la figura 6 se puede visualizar la vista lateral interna de la celda AIS.

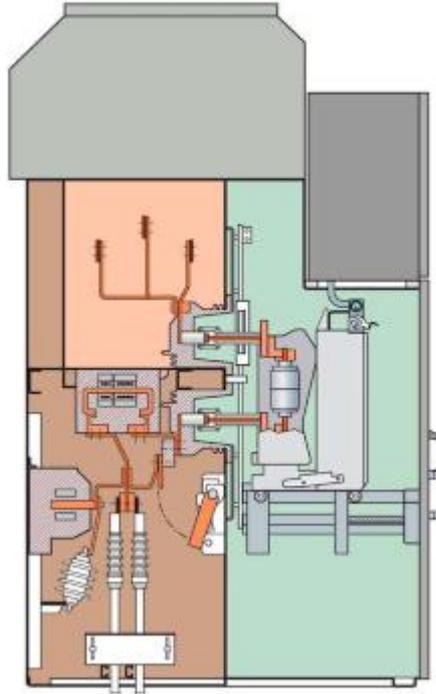


Figura 6: Celda de media tensión con aislamiento de aire
Fuente: Catalogo “ Low and medium voltage systems and solutions”[19]

2.3.4 Celdas SafePlus

Las celdas de media tensión SafePlus desarrolladas por ABB para la distribución secundaria de 12/24 kV que se insertaron en el mercado en el año 2000. Creadas para sustituir el gas SF₆ como medio de aislamiento completo, para utilizarlo como alternativa incorporando el gas en un tanque con barras colectoras dentro de un módulo del compartimiento de las celdas.[20]

SafePlus es un sistema flexible de equipos compactos con la capacidad de coordinar las configuraciones modulares y semimodulares, en su construcción tiene un sistema completamente sellado en una meta mecánica de acero inoxidable que engloba las piezas activas y las funciones de conmutación. Las ventajas que ofrece las celdas SafePlus, son[20]:

- Alta fiabilidad y seguridad
- Gama amplia de unidades funcionales
- Dimensiones compactas
- Partes vivas sin exposición
- Independencia climática
- Seguridad y facilidad para los operadores al realizar mantenimiento

En la figura 7 se detallan los compartimientos internos de la celda SafePlus.

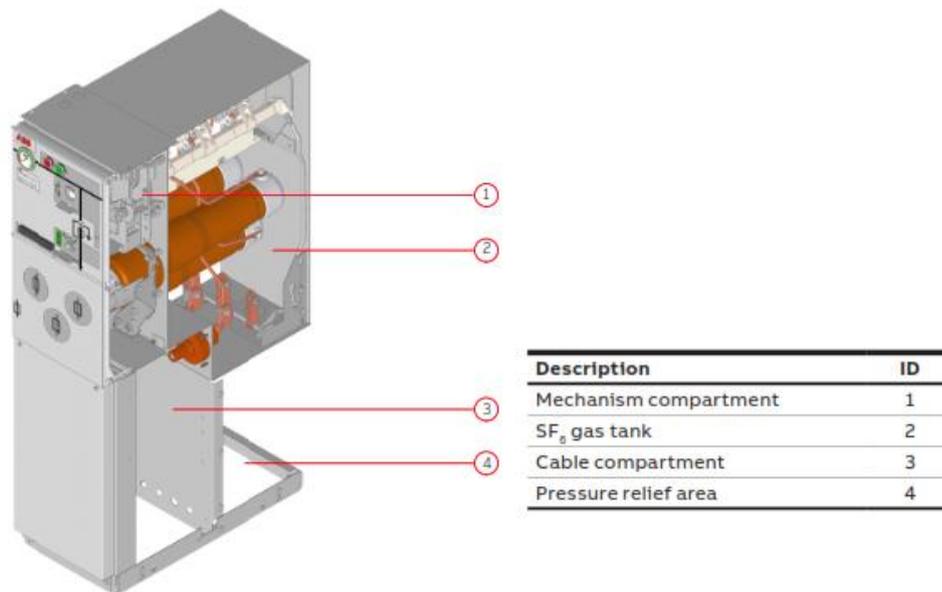


Figura 7: Celda de media tensión SafePlus

Fuente: Catalogo "SafeRing / SafePlus 12-24kV Gas-insulated ring main unit SafeRing and Compact switchgear SafePlus" [20]

2.4 Celdas primarias y secundarias

2.4.1 Celdas primarias

Las celdas de media tensión se pueden clasificar por su nivel de corriente de cortocircuito y de embarrado[19], pueden ser utilizadas dentro de diversas industrias, subestaciones eléctricas que manejan un nivel elevado de tensión, como se observa en la tabla 1.

I _{cc} [kA]	I _{embarrado} [A]
≥ 25 kA	>1200A

Tabla 1: Niveles de corriente en celdas primarias

Fuente: Catalogo "Low and medium voltage systems and solutions"[19]

2.4.2 Celdas secundarias

En la tabla 2 se detallan el nivel de corriente de cortocircuito y de embarrado en las celdas secundarias, que pueden ser utilizado para la protección de subestaciones eléctricas, edificios públicos, industrias, etc. [19]

I _{cc} [kA]	I _{embarrado} [A]
≤ 25 kA	<1200A

Tabla 2: Niveles de corriente en celdas secundarias

Fuente: Catalogo "Low and medium voltage systems and solutions"[19]

2.5 Tipos de celdas de media tensión

2.5.1 Celda con interruptor automático

Al no ser suficiente la protección mediante fusibles dentro de las celdas de media tensión, por causa de la potencia de uno o más transformadores, se realiza la protección a través un interruptor automático en el que se puede añadir varios tipos de funciones como protección diferencial, protección contra sobreintensidad, etc. [11]

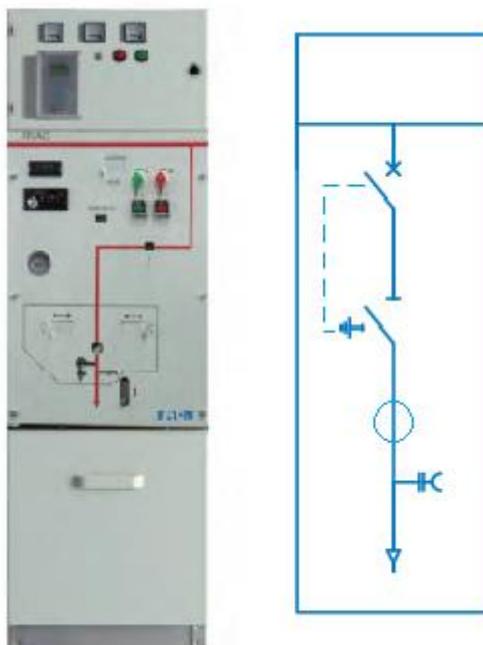


Figura 8: Celda con interruptor automático
Fuente: Libro "RVAC Professional solution, Realible power" [1]

2.5.2 Celda de protección con fusible

Dentro de las celdas MT, la protección con fusibles tienen la finalidad de proteger al transformador contra cortocircuitos, existen dos tipos[11]:

- Fusibles asociados: Se utiliza en el caso de no se produzca la apertura de la celda.
- Fusibles combinados: Se emplea cuando cualquiera de los tres fusibles de las líneas se daña y actúa el interruptor para evitar que el transformador funcione en dos fases.

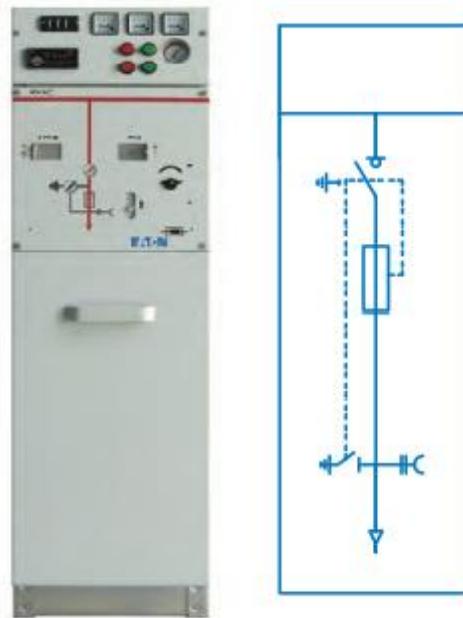


Figura 9: Celda de protección con fusible
Fuente: Libro” RVAC Professional solution, Realible power” [1]

2.5.3 Celda de seccionamiento

Esta celda de media tensión incluye un sistema independiente que se encarga de cortar el servicio en el punto de suministro de energía, en función a la potencia del transformador posee la protección por medio de seccionador si es inferior a 1000 KVA o interruptor automático superior a esa potencia. [10]



Figura 10: Celda de seccionamiento
Fuente: Libro” RVAC Professional solution, Realible power” [1]

2.5.4 Celda de remonte

Tiene como objetivo recibir los conductores que alimentan la conexión de las celdas y transportar la parte superior que entra por la parte inferior que sale y a la inversa. [10]

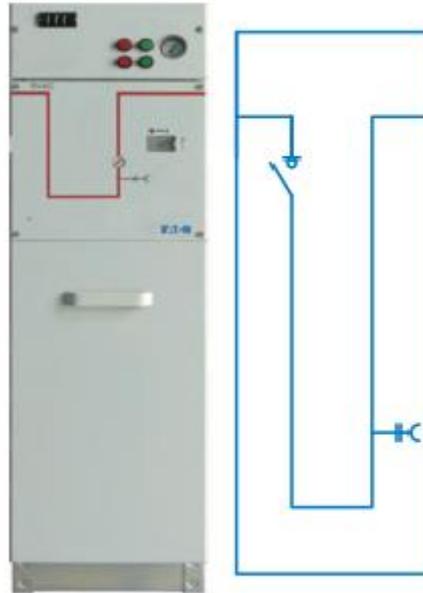


Figura 11: Celda de remonte

Fuente: Libro "RVAC Professional solution, Realible power" [1]

2.5.5 Celda de medida

Formada por transformadores de intensidad y tensión de pequeña potencia que alimentan los equipos de medida situados en el interior de la celda de media tensión, para evitar un riesgo para el personal al realizar la lectura de los parámetros de energía que pasan por el circuito. [10]

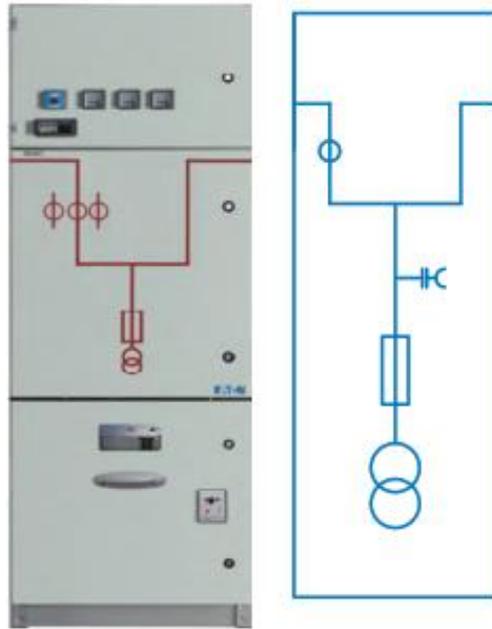


Figura 12: Celda de medida
Fuente: Libro” RVAC Professional solution, Realible power” [1]

2.5.6 Celda de protección de transformador

Tiene como objetivo la protección individual del transformador, por lo regular se ejecuta mediante un interruptor y fusibles combinados o interruptor automático controlados por relés de protección en función de las intensidades medidas por los transformadores de intensidad, con el fin de actuar en el caso de que se produzca un daño en los transformadores y dispare su protección para no cortar el suministro de energía. [10]

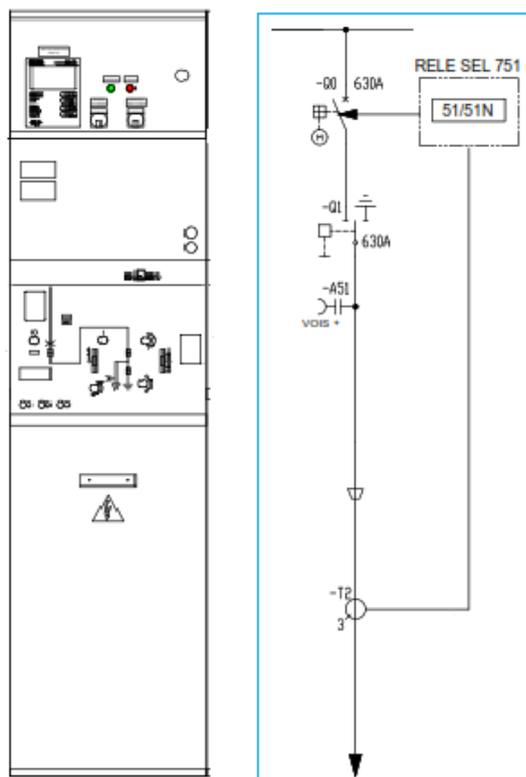


Figura 13: Celda de protección de transformador

Fuente: Autor

2.6 Protección para media tensión

El sistema de protección tiene como objetivo suministrar energía eléctrica de forma segura por medio de equipos o componentes que realizan esta función, el conjunto de sistemas y equipos puestos en funcionamiento del sistema eléctrico que supervisan la correcta operación, la protección tiene como propósito la prevención y corte de fallas eléctricas. [21]

2.7 Sistemas de protección en subestaciones eléctricas

El sistema de protección tiene como objetivo asegurar que el sistema funcione en las condiciones establecidas, y que realice su trabajo de forma imprescindible, incluye restricciones en su funcionamiento cuando sea necesario, en caso de fallas externas de la zona de protección. Se toma en consideración los factores como naturaleza, frecuencia y persistencia de las fallas eléctricas que se puedan presentar. Además, es esencial asegurarse que los ajustes de los parámetros de los equipos de protección y el sistema sean los adecuados, tomando en cuenta los niveles de carga, fallo y rendimiento del sistema. [22]

2.7.1 Dispositivos de protección

Son el conjunto de equipos o elementos de protección que realizan funciones específicas para las numerosas configuraciones y características de construcción, poseen todos los componentes necesarios que cumplen una función establecida para el funcionamiento del sistema.[22]

Entre los dispositivos que pueden constituir un sistema de protección están:

- Fusibles
- Interruptor de potencia
- Interruptores termomagnéticos
- Seccionadores
- Transformadores de corriente (CT)
- Transformadores de tensión (PT)
- Relés

2.7.2 Fusibles

Los fusibles son componentes de protección que tienen la función de detectar e interrumpir la falla eléctrica ya que esta conectados en la red, son componentes que operan de forma térmica, proporcionan un rendimiento incomparable de interrupción de alta velocidad para responder a fallas con rapidez.[23]

Tiene diversas aplicaciones como protección de equipos y circuitos eléctricos, tales como:

- Protección de redes de distribución
- Protección de instalaciones eléctricas
- Protección de transformadores de distribución
- Protección de motores eléctricos

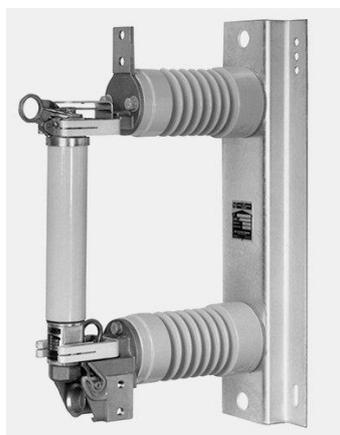


Figura 14: Fusible de protección

Fuente: Libro “Manual de sistemas de protecciones”[23]

2.8 Relé de protección

El relé es un dispositivo eléctrico de protección que posee la inteligencia por sí mismo de identificar las corrientes de falla además de temporizar su tiempo de respuesta y reconexión, a menudo, controla el funcionamiento del disyuntor. [9]

El objetivo principal del dispositivo de protección es aislar rápidamente una de las áreas problemáticas en el sistema de energía, de modo que el impacto en el resto del sistema se minimice y se conserve tanto como sea posible.[4]

Existen una amplia variedad de relés para detección de fallas y cumple con muchas condiciones del sistema, incluyendo sobrecorriente, sobrevoltaje, diferencial, impedancia, son los tipos que más se aplican para la protección en un sistema de distribución eléctrico. [9]

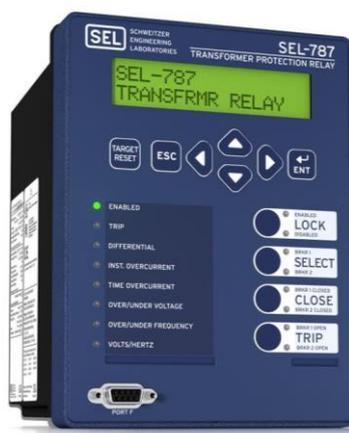


Figura 15: Relé de protección

Fuente: Manual "Relé de protección SEL 787"[40]

2.8.1 Características de operación del relé de protección

El relé de protección cuenta con cinco características principales[4]:

- **Fiabilidad:** Asegure el funcionamiento correcto de la protección.
- **Selectividad:** Máxima continuidad del servicio con mínima interrupción del sistema.
- **Velocidad de funcionamiento:** Tiempo mínimo de falla y los desperfectos en los equipos e inestabilidad del sistema.
- **Sencillez:** Dispositivo de protección mínimo y circuitos de interconexión para para lograr los objetivos de protección.
- **Economía:** Máxima protección al mínimo coste total.

2.9 Clasificación del relé según su función

2.9.1 Relés Electromecánicos

Son relés potentes y muy fiables tienen compuestos por componentes eléctricos, magnéticos y partes mecánicas, proporciona un aislamiento galvánico entre las entradas y salidas, básicamente tienen una bobina activa y múltiples contactos. Aplican el principio de fuerza mecánica que activa un contacto por reacción del impulso.

Se pueden clasificar en:[22]

- Relés de atracción electromagnéticas
- Relés de inducción



Figura 16: Relé Electromecánico

Fuente: Tesis “Protección Eléctrica de motores, generadores y transformadores, prácticas de laboratorio”

2.9.2 Relés Digitales

Los relés digitales cambiaron la tecnología al incorporar microprocesadores para la aplicación de algoritmos de protección, estos utilizan conversión digital de magnitudes.

Son obstante, los microprocesadores tienen una capacidad de memoria y procesamiento limitado de 8 a 16 bits que restringen el número de muestras de la forma de onda, de modo que, se limita la función de protección. [22]



Figura 17: Relé digital

Fuente: Libro “Network Protection & Automation Guide”[22]

2.9.3 Relés Numéricos

Los relés numéricos son avances tecnológicos que muestran fiabilidad en su diseño, derivado del relé digital, utilizando varios procesadores de señal digital que incluyen logaritmos matemáticos para el procesamiento de señales en tiempo real.

Tiene diversas funciones para la protección contra fallas como sobrecorriente o fallo a tierra, cada componente del relé está en el software que se procesan en el hardware ya que contiene el procesador de la señal que ejecuta las funciones del relé. [22]



Figura 18: Relé Numérico

Fuente: Libro “Manual de sistemas de protecciones”[23]

2.10 Funciones de los relés para el sistema eléctrico (ANSI/IEEE)

El relé en el sistema eléctrico de potencia ofrece diversas funciones de protecciones que están categorizadas por el estándar STD C372-1996, se presentan algunas funciones según sus características[24]:

- 21: Protección de distancia
- 27: Protección de bajo voltaje
- 49: Protección contra sobrecarga
- 50: Protección contra sobrecorriente instantánea
- 51: Protección contra sobrecorriente temporizada
- 59: Protección de sobrevoltaje
- 67: Protección contra sobrecorriente direccional
- 81: Protección de máxima y mínima Frecuencia
- 87: Protección diferencial

La función que se emplea en este trabajo de titulación es la protección contra sobrecorriente por sus cualidades, la protección de sobrecorriente es prevenir daños en los equipos y circuitos en el sistema eléctrico y evitar las interrupciones en el funcionamiento del sistema, los riesgos para el usuario y evitar el corte del suministro de energía, de este modo se puede conservar un alto nivel de servicio. [6]

Para proteger las subestaciones eléctricas, la protección contra sobrecorriente ayuda a identificar la sección defectuosa y energizar el dispositivo de disparo por cortocircuito con un valor de corriente alto, los tipos de protección contra sobrecorriente son[23]:

- Instantáneo de corriente definida
- Tiempo definido
- Tiempo inverso

2.10.1 Características de los parámetros del relé SEL 751

El relé SEL 751 como dispositivo automático de protección cuenta con diversas propiedades de control y automatización, incluye una gama completa de elementos de protección Incluyendo elementos de sobrecorriente, sobre frecuencia y subfrecuencia, elementos de medida de demanda, protección contra disyuntores y detección preliminar de fallas en cables para la protección de líneas y equipos que realizan operaciones en el sistema eléctrico. [25]



Figura 19: Relé de sobre corriente SEL 751
Fuente: Manual “Relé de protección SEL 751”

El relé SEL 751 proporciona una gama completa de protección, monitoreo de ubicación de fallas, control y comunicación en un gabinete industrial. Entre el conjunto de diversos elementos con los que cuenta el dispositivo están[25]:

- Protección instantánea
- Protección temporizada
- Monitoreo y medición
- Sobreintensidad de fase
- Sobreintensidad de tiempo inverso
- Secuencia negativa, residual y neutro
- Control de reconexión automática
- Localización de daños
- Protección de arco eléctrico

En la figura 20 se muestra el resumen de las funciones en cuanto a despeje de fallas eléctricas en el dispositivo de protección.

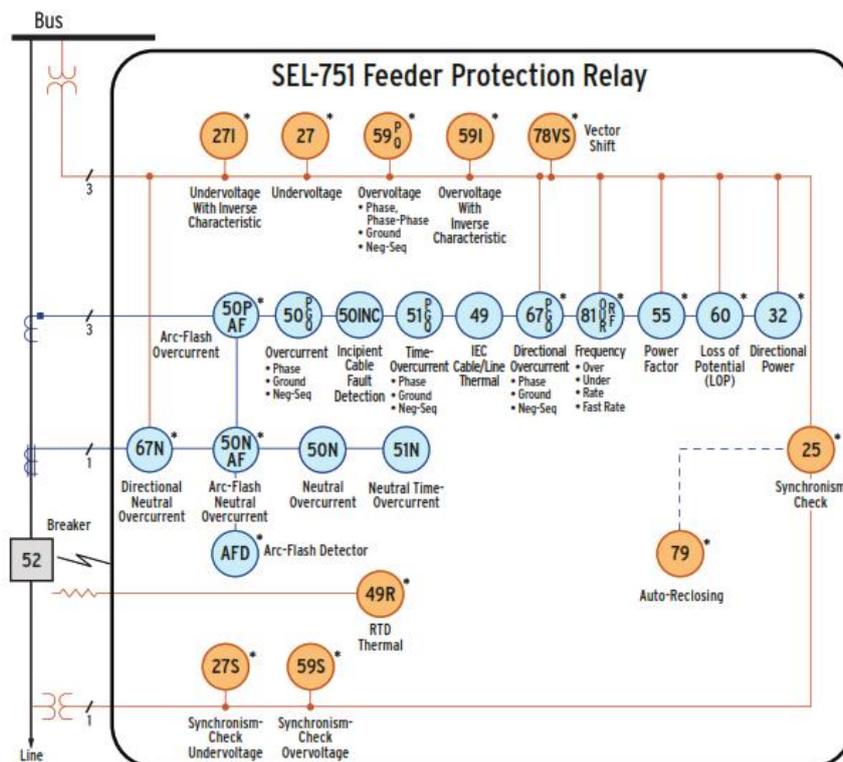


Figura 20: Resumen de funciones SEL 751
Fuente: Manual "Relé de protección SEL 751"[25]

2.11 Coordinación de los sistemas de protección

Es el estudio que tiene la finalidad de disminuir los riesgos al usuario y los equipos frente a anomalías en el sistema, donde los diagramas de protección deben actuar de forma selectiva y rápida en presencia de las fallas eléctricas, considerando restricciones de actuar cuando el sistema este en operación normal. [26]

Para solucionar la presencia de fallas eléctricas, se pueden emplear una variedad de equipos de protección coordinados entre sí, que se utilizan en varios casos para proteger de otros dispositivos de protección como protección de respaldo, este es el punto de partida para tener un sistema eficiente en operación. [9]

2.11.1 ETAP

ETAP es un software de simulación completo y eficaz para sistemas eléctricos, posee muchos módulos orientados al diseño, organización y funcionamiento óptimo del sistema eléctrico en la industria, es uno de los programas más empleados en simulaciones de sistemas de potencia, debido a las herramientas que tiene para que sean utilizadas por el usuario, así como[26]:

- Dimensionamiento de conductores en módulos transversales.

- Configuraciones de esquemas de protección.
- Analizador de flujo de carga.
- Análisis del flujo de potencia por métodos numéricos.
- Creación de informes técnicos detallados para el usuario.

2.12 Sistema de comunicación SCADA en subestaciones eléctricas

A medida del aumento del suministro de energía eléctrica, se desarrollaron tecnologías nombradas “control de supervisión y adquisición de datos” o por sus siglas SCADA, que facilita el monitoreo remoto además del control de parámetros en el sistema eléctrico, al emplear estos sistemas se reduce la necesidad de personal en subestaciones eléctricas. [6]

El sistema SCADA incluye información de los puntos de estado y control del sistema que se deben supervisar, es una arquitectura que se basa en computadores que supervisa y controla de manera remota variables de proceso, mediante la comunicación con los equipos de campo y el control de forma automática mediante un software especializado.[27]

2.12.1 Características del sistema SCADA

Los sistemas SCADA en la actualidad aplican el uso de un maestro Scada en el cual la información remota se visualiza en el terminal de un sistema de gestión monitoreado por un operador a través de la red[6], entre las principales características, encontramos[27]:

- Control remoto de los equipos en el sistema.
- Supervisión remota de información y ajuste en los niveles de funcionamiento de los equipos desde cualquier ubicación.
- Ahorro económico al ser un sistema completo que realiza la supervisión, minimiza las revisiones innecesarias.
- Alerta de revisiones predictivas o correctivas cuando un equipo presente más fallos de los normales.
- Modificación digital de las características del sistema sin requerir cableado de la instalación.
- Generar reportes impresos de los detalles técnicos del funcionamiento del sistema.

2.13 Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación son estándares o normas de comunicación que se emplean en la forma de comunicación los dispositivos en el sistema. En la actualidad, en la comunicación en subestaciones se pueden recibir todos los protocolos a través de convertidores de protocolos.[6]

Los protocolos con acceso abierto el uso de la tecnología es alcanzable para todos los usuarios, donde se pueden comunicar dispositivos de diversos fabricantes, para la comunicación en subestaciones eléctricas se necesitan protocolos que procesen con rapidez la información, en la actualidad se utilizan los protocolos DNP3 e IEC 61850.[28]

En subestaciones antiguas se pueden encontrar otros protocolos abiertos como Modbus, IEC 60870, Profibus, entre otros.

En las subestaciones eléctricas se pueden encontrar una gran número de equipos que se deben supervisar, por esta razón la comunicación se divide en niveles para solucionar un tipo de problema especial, ya que la comunicación se realiza de diferentes tipos de dispositivos, encontramos los siguientes niveles de comunicación[28]:

- Comunicación en campo, entre el equipo primario y los equipos de protección.
- Comunicación bahía, entre los equipos de protección, se utiliza el protocolo IEC 61850.
- Comunicación en la subestación, entre los equipos de protección y el sistema SCADA, se utiliza el protocolo DNP3.
- Comunicación de niveles superiores, entre la subestación y los centros de control remotos, se utiliza con el protocolo DNP3.

2.13.1 Características del protocolo DNP3

El protocolo de red distribuida o conocido como DNP fue creado por la compañía WESTRONIC con el fin de tener un protocolo libre dentro de la industria eléctrica en especial para aplicaciones SCADA para realizar tareas de adquisición de información y envío de comandos de control entre una estación maestra y una estación esclavo.[28]

El protocolo DNP3 fija un método de comando respuesta para comunicar información digital entre una computadora host y otra computadora esclava. En DNP3, hay dos tipos de dispositivos conectados al bus: dispositivos maestro y esclavo.[28]

El protocolo DNP3 es utilizado con frecuencia en sistemas SCADA, en donde el tiempo exacto de la información de un evento, sincronización y el hecho de que una estación esclava pueda transmitir información sin solicitarse, es primordial al momento del análisis de fallas y sincronización del accionamiento de todos los equipos. [28]

2.13.2 Características del protocolo IEC-61850

El protocolo IEC 61850 es la norma internacional de comunicaciones que se utilizan en subestaciones eléctricas, este estándar de comunicación cumple con muchos tipos de tarea específicas como sostener todas las funciones de control, supervisión y protección lo cual optimiza los sistemas interoperables de varios equipos que no pertenecen de un mismo fabricante, sin necesidad de agregar otros elementos de enlace. [28]

El estándar, reemplaza el método tradicional de disparar el interruptor a través del contacto con el mensaje GOOSE enviado por Ethernet o fibra, para que el mensaje llegue al destino en menos tiempo.[28]

El protocolo IEC 61850 permite[29]:

- El monitoreo, control y protección a niveles de subestaciones a través de entradas y salidas digitales.
- Reducir costos en interconexión
- Utilizar un solo protocolo para toda la subestación, evitando puertas de enlaces (gateway).
- Interoperable entre todos los proveedores y usuarios proporcionando el acceso al mismo lenguaje y características.
- Intercambio de datos de alta velocidad.

2.14 Arquitectura SCADA

La automatización de la subestación es controlada automáticamente por el sistema SCADA, se compone de información que transmiten los dispositivos electrónicos que admiten control y automatización además de comandos de control del usuario de forma remota del sistema eléctrico en la subestación. [30]

Las subestaciones antiguas contienen una gran cantidad de cables de cobre para el cableado del sistema de comunicación que incrementa el gasto económico y pueden causar interferencias electromagnéticas. Una arquitectura de subestación digital puede constar de tres jerarquías funcionales diferentes: el nivel de proceso, el plano de protección y control y el plano de control de la subestación. [30]

La arquitectura de una subestación puede estar constituida por tres niveles jerárquicos diferentes como se observa en la figura 21, estos son[28]:

- Nivel de proceso
- Nivel de protección y control
- Nivel de control de la subestación

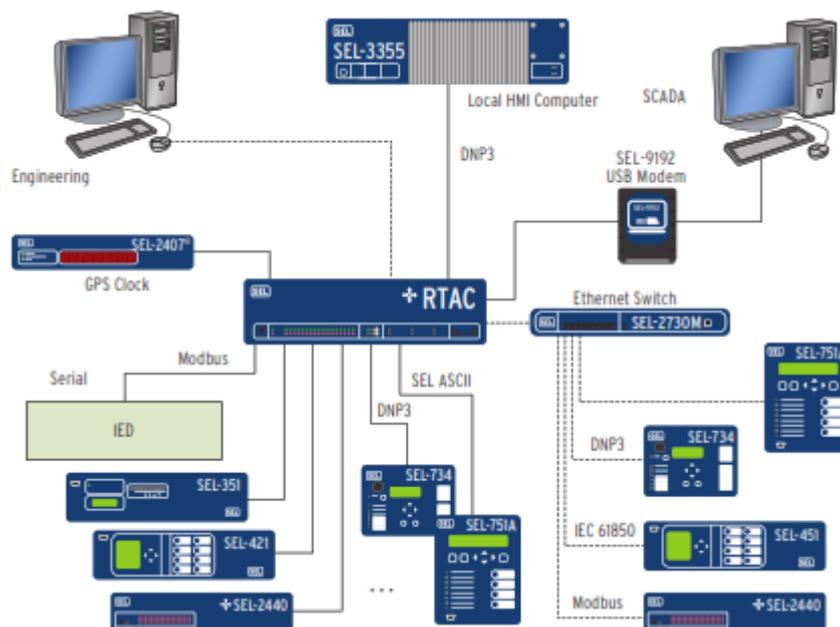


Figura 21: Arquitectura de comunicación
Fuente: Manual "RTAC Sel 3530"[31]

2.14.1 Rack de comunicaciones

El rack de comunicación estructuralmente es una armadura metálica con una amplitud estandarizado de 19 inch, se colocan por su utilidad en los centros de procesos de datos, en el espacio dentro de su armazón se necesita alojar una gran cantidad de dispositivos informáticos, electrónicos y de comunicaciones. Debe contener ventiladores y extractores de aire, así como conexiones idóneas de energía. La armadura contiene guías horizontales donde se consigue sostener el equipamiento, tal como los puntos de anclaje para los tornillos que fijan el equipamiento a la armadura. [32]

En la figura 22 se muestra la estructura metálica del rack de comunicaciones con los dispositivos de comunicación internos que forman un SCADA.

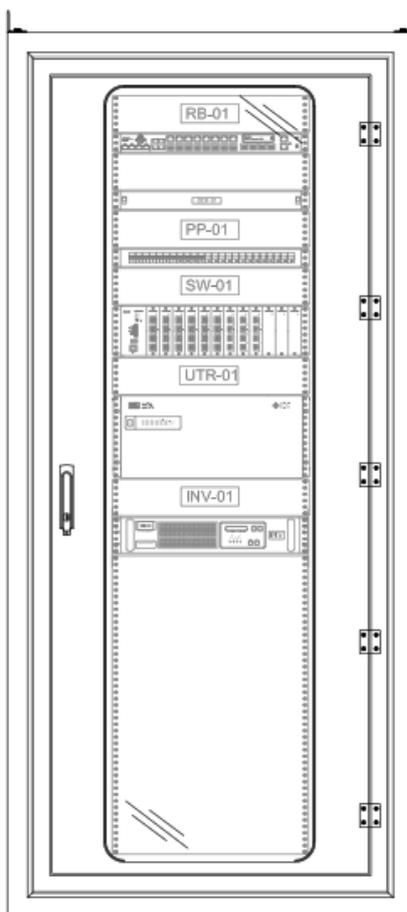


Figura 22: Rack de comunicaciones
Fuente: Autor

2.14.2 Switch ethernet SEL 2730M

El Switch ethernet SEL 2730M fue diseñado para ambientes que se suelen encontrar en industrias energéticas y servicios públicos, es parte de la estructura de comunicación para el acceso de ingeniería, supervisión, control y adquisición de datos o también conocido como SCADA, brinda la misma fiabilidad que se localiza en los relés de protección. [33]

Las características que posee el Switch ethernet SEL 2730M se presentan a continuación[33]:

- Fiabilidad
- Flexibilidad
- Facilidad de uso
- Red Aérea local virtual (VLAN)



Figura 23: Switch ethernet SEL 2730M

Fuente: Catalogo "SEL-2730M 24-Port Managed Ethernet Switch"[33]

2.14.3 Módulo DPAC SEL 2440

El SEL 2440 es un módulo DPAC equipado con tres puertos seriales, que establecen la comunicación conectando módems, ordenadores, convertidores de protocolo y un puerto RTU para el uso local o remoto, sin necesidad de un software de comunicaciones especiales. [34]

Las I/O que posee el módulo son entradas y salidas compactas, tiene la capacidad de programar funciones lógicas, temporizadores, contadores y garantiza el funcionamiento usando una entrada lógica programada para el control local o remoto.[34]

Las funciones y beneficios del DPAC SEL 2440 son[34]:

- Comunicación flexible
- Soporte de mantenimiento
- Dispositivo de gestión conveniente
- Fácil integración al SCADA

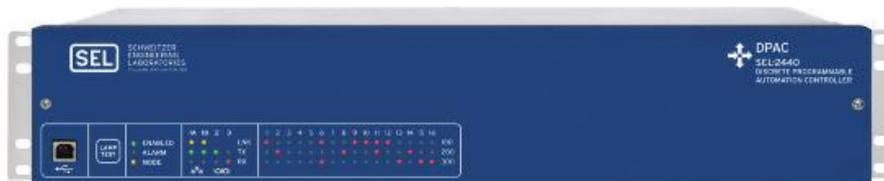


Figura 24: Modulo DPAC SEL 2440

Fuente: Catalogo "SEL-2440 Discrete Programmable Automation Controller" [34]

2.14.4 GPS SEL 2488

El SEL 2488 es un reloj sincronizado que recibe señal horaria del sistema global de navegación por satélite conocido como GNSS, distribuye la hora exacta a través de varios protocolos de salida, protocolo de tiempo exacto y el protocolo de tiempo de red, las características del GPS lo hacen adecuado para protección en subestaciones con requisitos de sincronización de tiempo ya que proporciona una salida de tiempo para aplicaciones de protección, sincronización de relés y otros dispositivos IED.[35]

Al proporcionar niveles más altos de precisión, flexibilidad, confiabilidad y facilidad de uso, al tiempo que brinda capacidades mejoradas que lo hacen particularmente adecuado para aplicaciones de infraestructura crítica.[35]

Entre las características que existen del GPS SEL 2488 [35]:

- Precisión horaria
- Distribución flexible del tiempo
- Seguridad
- Integración fácil y segura
- Fiabilidad en entornos difíciles



Figura 25: GPS SEL 2488

Fuente: Catalogo “SEL-2488 Satellite-Synchronized Network Clock” [35]

2.14.5 RTAC SEL 3530

El controlador de automatización en tiempo real o también conocido por sus siglas RTAC es un equipo conveniente para ser utilizado en subestaciones eléctricas o sistemas de control industrial y automatización, el equipo de comunicación dentro de sus características ofrece un control flexible y completo, continua configuración con lógica integrada. [31]

Al utilizar la autenticación central de protocolo ligero de acceso y autenticación de usuario en base a roles, se transforma a un punto de acceso segura para subestaciones o plantas eléctricas. [31]

Se configura la RTAC para la función de servidor con el protocolo 104 sobre TCP/IP, de esta forma se concentran las señales de los IED a cualquier SCADA dentro del centro de control. [31]



Figura 26: RTAC SEL 3530

Fuente: Manual “RTAC Sel 3530”[31]

2.15 AcSELeRator RTAC

Para configurar el RTAC, se requiere un software suministrado por la patente para ejecutar los trabajos que se requieran realizar. El software AcSELeRator RTAC (SEL 5033), permite realizar la configuración de datos, comandos, protecciones, con un sistema confiable y de seguridad. Sirve para configurar el equipo principal dentro del tablero de

comunicaciones y completar la configuración de los dispositivos primarios mediante un cable USB, desde un computador se puede efectuar cambios que permitan el correcto funcionamiento del sistema SCADA en la subestación eléctrica. [29]

El software AcSELerator SEL 5030 es un programa que la finalidad es que se pueda realizar la configuración de los relés SEL, para administrar los dispositivos de forma fácil y rápida para controlar, proteger y monitorear los sistemas eléctricos. [31]

En la figura 27 se muestra la vista del software AcSELerator en la creación de un diagrama unifilar de control de dispositivos.

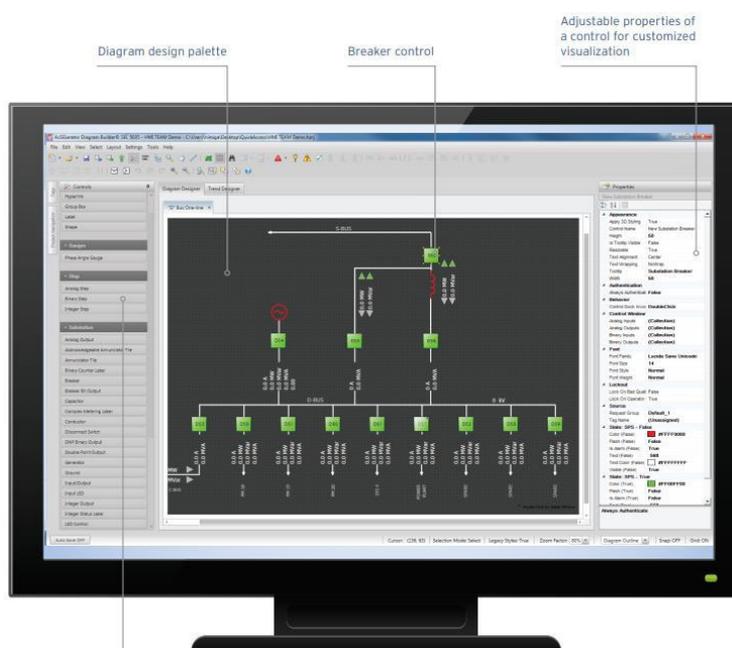


Figura 27: RTAC SEL 3530
Fuente: Manual "RTAC Sel 3530"[31]

2.15.1 Características principales

Entre las características que posee el software AcSELerator RTAC se detallan las siguientes[31]:

- Creación de un proyecto para cada sistema
- Insertar y configurar múltiples protocolos para dispositivos
- Asignación de datos desde dispositivos IED o receptores de datos remotos
- Texto estructurado
- Diagrama lógico de escalera
- Bloque de función continuo
- Creación de la configuración de dispositivos

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 Planteamiento del caso

Para el planteamiento de la metodología, en base a un caso del libro “Protective relaying” de J. Lewis Blackburn y Thomas J. Domin[4], en el cual se colocará el sistema de protección por medio de celdas de media tensión y el sistema de comunicación SCADA.

En el caso, el sistema se alimenta de una línea de 115 kV a través de un transformador de 15 =20 =25 MV A protegido por un fusible del lado de alta, la carga máxima que se toma es 25 MVA:

$$\frac{25000}{\sqrt{3}} \times 115 = 125.5 \text{ A para } 115\text{kV}$$

El fusible 125E se seleccionó para el primario del banco de transformación, su tiempo de funcionamiento cercano a los 250 A es de 600 segundos. En el lado de baja se muestra un alimentador típico de 13,09 kV con varias líneas en una subestación de distribución, se traza a $115/13.09= 8.79$ veces las curvas del fabricante.

La carga máxima a través del breaker y los relés en el bus de 13 kV es 330 A. Por lo tanto, la relación del TC de 400:5 dará una corriente secundaria de $330/800=4,13$ A.

Los relés de sobrecorriente proporcionan una buena coordinación con los fusibles y el cierre, la selección del tap 9 proporciona un pickup del relé de fase de $9 \times 80= 720$ A, algo más del doble de la carga máxima necesaria; el relé de tierra se coloca en la tap 4 por elección. Esto proporciona un pickup 13 kV de $4 \times 80= 320$ A, los ajustes de tiempo para la fase y el relé de tierra proporcionan un CTI de al menos 0,2 segundos.

En la figura 10 se muestran los fusibles de 65T y 100T seleccionados en función de la carga servida por los grifos a partir de las curvas del fabricante, La carga máxima a través del reconectador es de 230 A. Se seleccionó un reconectador con una capacidad de disparo mínima de 560 A de fase.

3.1.1 Unifilar de la subestación eléctrica

Se delimita un caso de estudio en el cual se basa el diagrama unifilar de la subestación eléctrica que se puede observar en la figura 28 muestra el diagrama unifilar donde se colocarán cuatro celdas de protección, la primera celda principal para la barra, y tres celdas de salida para la distribución.

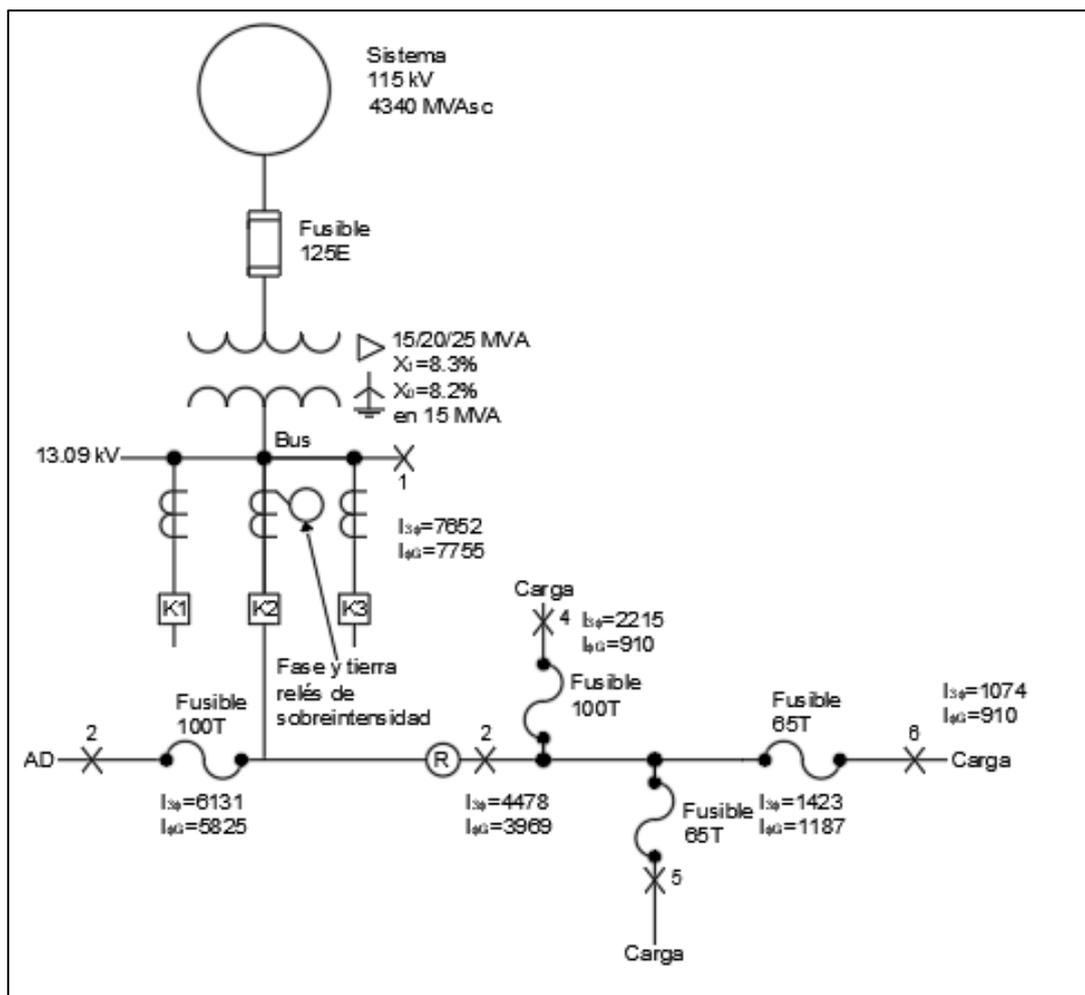


Figura 28: Diagrama Unifilar de la subestación eléctrica
Fuente: Libro "Protective Relaying" [4]

A partir del diagrama unifilar se plantea el diseño del sistema de protección las celdas de media tensión para el control y protección de la barra de 13,09kV y la distribución de los circuitos de alimentadores de salida.

3.1.2 Celdas de media tensión

Las celdas de media tensión con las cuales se toma como referencia para realizar el diseño son las celdas marca SIEMENS por el acceso a información de los diversos tipos de celdas que maneja la marca y los programas para diseñar las celdas con los datos técnicos del sistema.

Para la elección del tipo de celda que se utiliza en el diseño se evalúa la información del sistema proporcionada por el caso de estudio.

SISTEMA DE MEDIA TENSIÓN	
VOLTAJE	13,09 kV
CORRIENTE	330 A

Tabla 3: Sistema de media tensión

Fuente: Autor

De acuerdo con la referencia de la tabla 2 la clasificación de las celdas según el nivel de distribución se puede concluir que las celdas de media tensión para el diseño en caso de estudio son celdas secundarias.

Valorando los datos técnicos de la celda de media tensión de SIEMENS al elegir un tipo de celda idónea para el caso, se debe revisar la tabla 4.

Nivel de distribución	Aislamiento	Sistema de embarrado	Tipo de celdas	Datos eléctricos (máx.)			
				U, [kV]	I_k [kA]	$I_{embarrado}$ [A]	$I_{derivación}$ [A]
Nivel de distribución secundaria	Aislamiento por gas	Simple	NXPLUS C	24 15	25 31,5	2500 2500	2000 2500
			8DJH	24 17,5	20 25	630 630	630 630
			8DJH 36	36	20	630	630
	Aislamiento por aire		SIMOSEC	24 17,5	20 25	1250 1250	1250 1250
Viento	Aislamiento por gas	Simple	NXPLUS C Wind	36	25	1000	1000
Electrificación ferroviaria	Aislamiento por gas	Unipolar	8DA11	27,5	31,5	3150	2500
		Bipolar	8DA12	27,5	31,5	3150	2500

Tabla 4: Matriz de selección

Fuente: SIEMENS [41]

De acuerdo a la matriz de selección las celdas tipo SIMOSEC con aislamiento por aire, se ajustan a los datos técnicos de nuestro sistema base para el diseño de las celdas de media tensión.

La marca SIEMENS, dispone del software SIMARIS Project para la elaboración de diseños de equipos, construcción de sistemas de distribución, componentes eléctricos. Al ingresar los datos del sistema en donde se van a colocar las celdas de media tensión con la información de los niveles de voltaje y corriente, este va realizando el diseño con los componentes internos de los equipos, el formato se puede modificar en el programa

AutoCAD, para el ajuste de los datos, componentes dentro de la configuración interna, etc.

De acuerdo a la subestación eléctrica donde van a colocar las celdas de media tensión puede variar el diseño de la cantidad de celdas de media tensión a utilizar, esto depende de factores económicos, de seguridad y espacial.

Al ser un caso de estudio se realiza el diseño más seguro para el sistema, con un presupuesto económico alto.

En la figura 29 se logra observar la vista frontal de la fachada externa de la distribución de las celdas de media tensión, para la entrada de los cables provenientes de la salida de baja del transformador se sitúa una celda de acometida de entrada para los cables, luego esta se conecta a la celda principal de protección para el bus de 13,09kV que pasa a una celda de remonte de cables que se conecta a las celdas de salida de distribución para los alimentadores que se denominan K01, K02 y K03, dentro del anexo 1 se muestra con detalle el plano de las celdas MT.

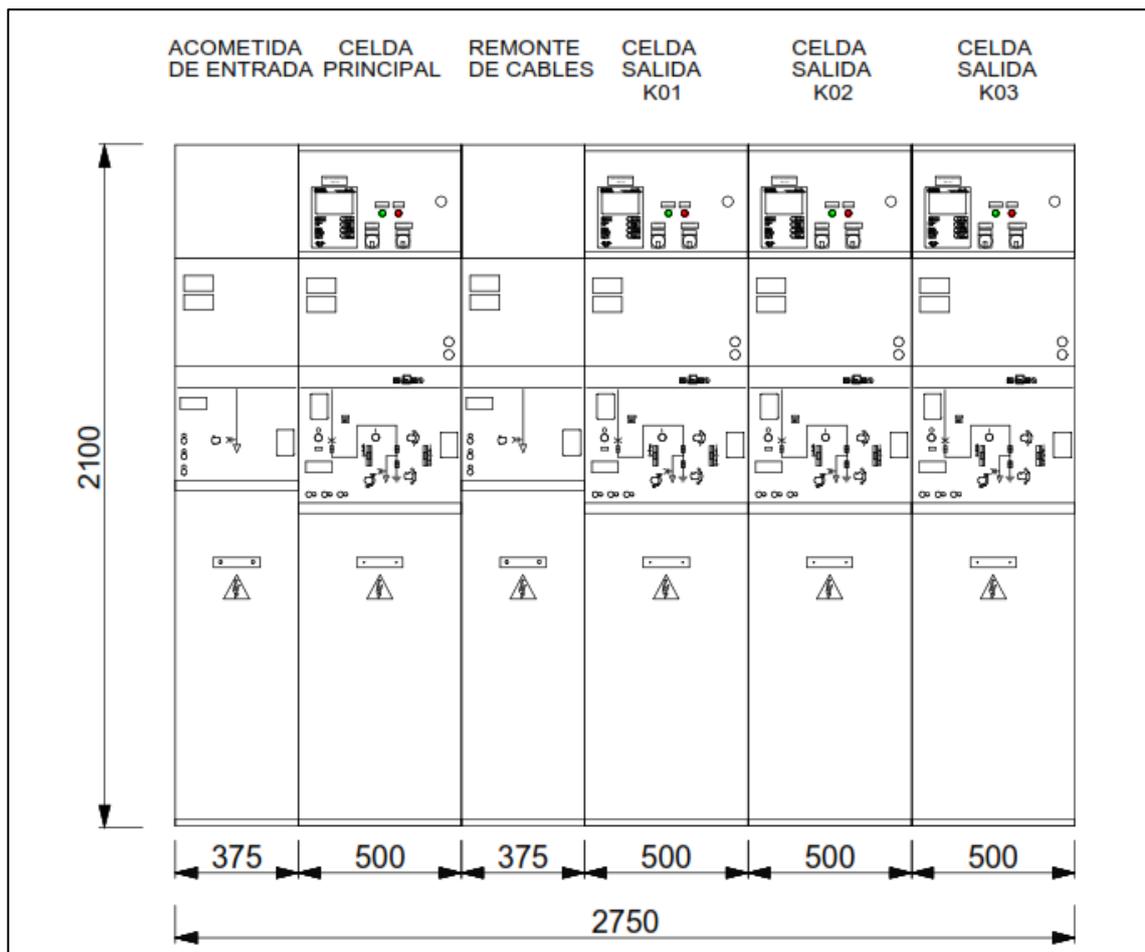


Figura 29: Celdas de media tensión tipo SIMOSEC
Fuente: Autor

En la figura 30 se toma en consideración la vista superior de las celdas de media tensión para analizar las medidas de profundidad de las celdas.

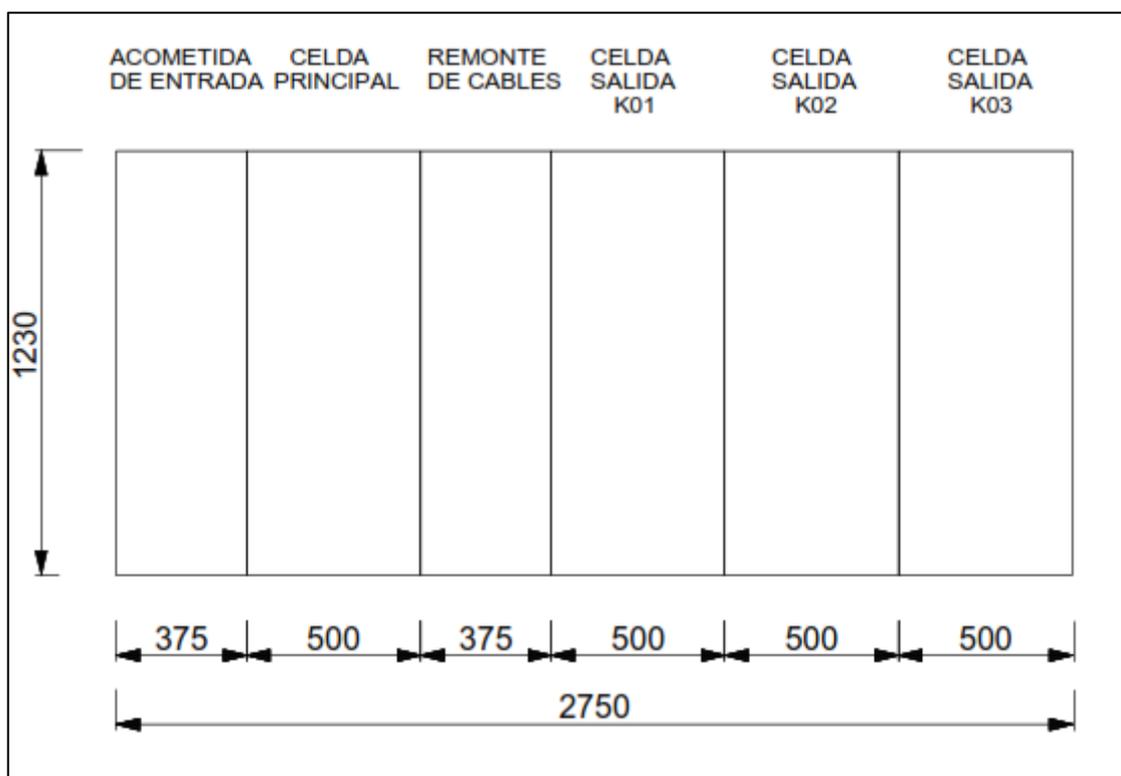


Figura 30: Vista superior de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC

Fuente: Autor

Para ubicar las celdas de media tensión dentro de la infraestructura donde se van a situar, se toma en consideración las medidas mínimas de seguridad para colocar las celdas de media tensión véase en la tabla 5 y las medidas de la puerta para la apertura y cierre de esta, dirigirse a la tabla 6.

Pasillo de servicio	≥ 1000 mm
Distancia a la pared, derecha	≥ 100 mm
Distancia a la pared, izquierda	≥ 100 mm
Distancia a la pared para tipo de celda "CC" :	
Distancia a la pared, derecha	≥ 600 mm
Distancia a la pared, izquierda	≥ 600 mm
Distancia a la pared por detrás	≥ 35 mm
Altura del techo	
Altura del techo	≥ 2400 mm

Tabla 5: Distancias mínimas

Fuente: SIEMENS [41]

Ancho de celda & celda Combinación	Luz de la abertura de la puerta ANxAL (mm)		
	para altura de las celdas 1750 mm (sin compartimento de baja tensión, sin canal de alivio de presión)	para altura de las celdas 2100 mm (con compartimento de baja tensión, 350mm)	para altura de las celdas 2300 mm (con compartimento de baja tensión, 550mm)
750 mm	1000x2000	1000x2300	1000x2400
1000 mm	1250x2000	1250x2300	1250x2400
1250 mm	1500x2000	1500x2300	1500x2400

Tabla 6: Apertura mínima de la puerta
Fuente: SIEMENS [41]

El software SIMARIS entrega una documentación del proyecto donde se muestran todos los datos técnicos constructivos dirigirse a la tabla 7 y los estándares de fabricación señalados en la tabla 8, que son utilizados para el dimensionamiento de las celdas.

Datos Técnicos

Tipo de instalación	SIMOSEC
Estándar	IEC
Tensión asignada [kV]	17,5
Tensión de empleo [kV]	13,09
Frecuencia asignada [Hz]	60
Tensión soportada asignada de corta duración a f frecuencia industrial Ud [kV]	38
Tensión soportada asignada de impulso tipo rayo Up (BIL) [kV]	95
Temperatura mín. del aire ambiente [°C]	-5
Temperatura máx. del aire ambiente [°C]	40
Corriente admisible asignada de corta duración: [kA/s]	20/1
Corriente asignada en servicio continuo, embarrado [A]	630
Tipo de instalación	Instalación libre
Clasificación de arco interno (IAC)	IAC A FLR 20kA 1s
Canal de alivio de presión	Sí
Dirección del alivio de presión	Hacia arriba
Altura mínima del local [mm]	2400
Profundidad [mm]	1230
Sistema detector de tensión cap.	VOIS+
Equipos secundarios con comunicación	No
Calefacción de celda	Con
Peso total [kg]	1980
Dimensiones exteriores	
Ancho total [mm]	2750
Altura [mm]	2100
Profundidad [mm]	1230

Tabla 7: Datos técnicos de las celdas de media tensión
Fuente: SIMARIS

Standards

Title	IEC /EN	Local standards
Medium voltage switchgear		
Common destinations for norms of high voltage switch devices	62271-1	DIN VDE 0671-1 GB/T 11022
Metal-cladded alternating current switch boards for rated voltages beyond 1 kV up to and including 52 kV	62271-200	DIN VDE 0671-200 GB 3906
High voltage current with nominal alternating voltage beyond 1 kV	61936-1	DIN VDE 0101
Electrical plants in operation	EN 50 110	DIN VDE 0105-100
Instruction for Sulphur hexafluoride (SF ₆) of technical purity grade for using in electrical manufacturing resources for new SF ₆	60376	DIN VDE 0373-1
Protection classes by casing (IP-Code)	60529	DIN VDE 0470-1 GB 4208
Insulation coordination	60071	DIN VDE 0111 GB/T 311.2
Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts	IEC62262	DIN VDE 0470-100
Medium voltage switching devices and monitoring installations		
High voltage alternating current switch devices	62271-100	DIN VDE 0671-100 GB 1984
High voltage alternating current gate and motor starters with gates	60470	DIN VDE 0670-501
High voltage alternating current circuit-breaker and -earthing switch	62271-102	DIN VDE 0671-102 GB 1985
Specification for high-voltage switches. Switches for rated voltages above 1 kV and less than 52 kV	60265-1	DIN VDE 0670-301
High voltage circuit breaker for rated voltages beyond 1 kV and lower than 52 kV	62271-103	DIN VDE 0671-103 GB 3804
Protecting combinations of high voltage circuit breaker	62271-105	DIN VDE 0671-105 GB 16926
High voltage fuses – current limiting fuses	60282	DIN VDE 0670-4 GB 15166.2

Alternating current switch devices for voltages of more than 1 kV - Selection of current limiting fuse insertions for transformer circuit	60787	DIN VDE 0670-402
Over-voltage protection	60099	DIN VDE 0675
Instrument transformers - Current transformers	61869-1	DIN VDE 0414-9-1
Instrument transformers - Inductive voltage transformers	61869-2	DIN VDE 0414-9-2 GB 1208
Instrument transformers - Combined transformers	61869-3	DIN VDE 0414-9-3 GB 1207
Voltage diagnostic systems (VDS)	61243-5	DIN VDE 0682-415 DL/T 538-2006

Tabla 8: Estándares de las celdas de media tensión
Fuente: SIMARIS

En la tabla 8 se presentan las normas que se utilizan para la regulación y seguridad de la fabricación de las celdas de media tensión, las siglas de los estándares se presentan en diversos países, a continuación, se presentan los que utiliza el programa SIMARIS:

- IEC: Estándar inglés
- DIN VDE: Estándar Alemán
- GB & DL/T: Estándar China
- NBR: Estándar Brasil

3.1.3 Control de las celdas de media tensión

El diagrama unifilar interno de las celdas de media tensión presenta la conexión de los componentes van a realizan la función de protección.

La figura 31 muestra el diagrama unifilar de las celdas de media tensión para realizar la función de protección dentro del caso de estudio, la celda 1 y 3 al ser celdas de remonte para pasar los cables de llegada y cables que se conectan a la salida de las celdas de distribución para alimentadores, en el anexo 2 se muestra el plano del unifilar de la celda de forma más amplia.

El circuito este compuesto por un interruptor de potencia motorizado (Q0), seccionador con puesta a tierra (Q1), sistema detector de tensión capacitivo (VOIS) relé de protección SEL-751 (51/51N) y transformador de corriente (T2).

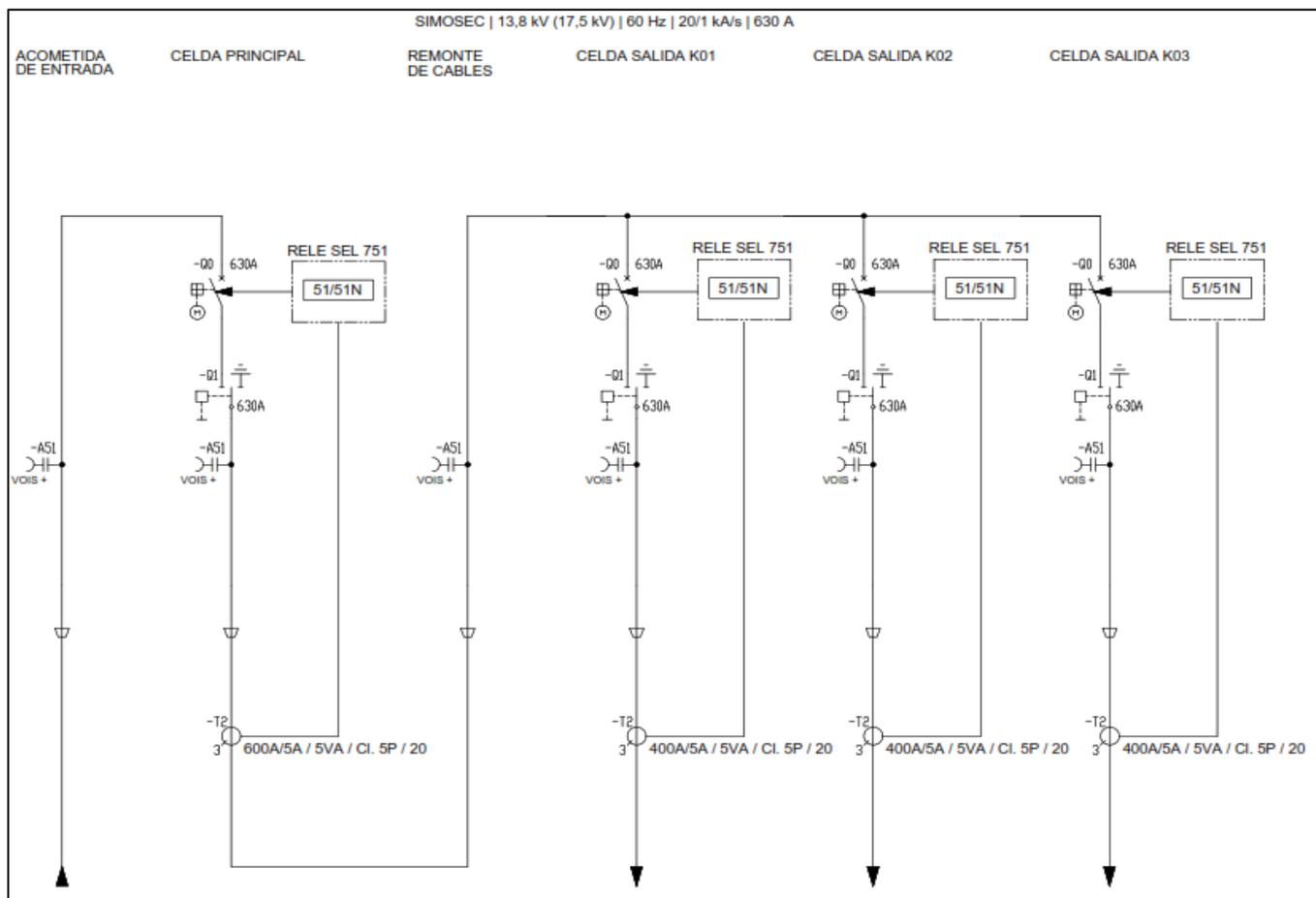


Figura 31: Diagrama unifilar de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC

Fuente: Autor

En el diseño de las celdas de MT entre los elementos internos del modelo se sitúan los relés de protección contra sobrecorrientes SEL751 que son los encargados de proteger y eliminar fallas en el circuito, el propósito de realizar la combinación de SIEMENS para la estructura de la celda y SEL para el equipo de protección automático, es el acceso a la información y a la configuración del equipo ya que, en la Universidad Politécnica Salesiana en el laboratorio de protecciones eléctricas cuentan con diversos relés de protección SEL para realizar su configuración y ponerlos en funcionamiento.

Al implementar las celdas de media tensión en el diagrama unifilar del caso de estudio, este se modifica aplicando la configuración interna del esquema que se muestra en la figura 32, para observarlo con mayor detalle dirigirse al anexo 3.

En las estructuras de las plantas eléctricas incluyen un cuarto de equipos donde se van a ubicar tableros, celdas de media tensión, banco de baterías, equipos de telecomunicaciones, etc.

En la tabla 9 y tabla 10 señala las dimensiones promedio que tiene que tener la estructura y los componentes dentro de ella.

Cuarto de equipos	Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> - Rutas o vías para paso de cables. - Infraestructura de acometida cableada. - Voceo - Detección y alarma de incendios. - Sistemas de seguridad de red.
	Alto: $\geq 4\text{m}$ (13 pies) Ancho: $\geq 3\text{m}$ (10 pies)	

Tabla 9: Dimensiones del cuarto de equipos

Fuente: Libro "National electrical code" [36]

Según el Catálogo de las celdas SIEMENS, las dimensiones para la instalación de las celdas se indica en la figura 33 según el tipo de montaje, se escoge como referencia el montaje junto a la pared que señala las medidas de seguridad de alto, ancho y las medidas adecuadas de la trinchera subterránea para la acometida de cables.

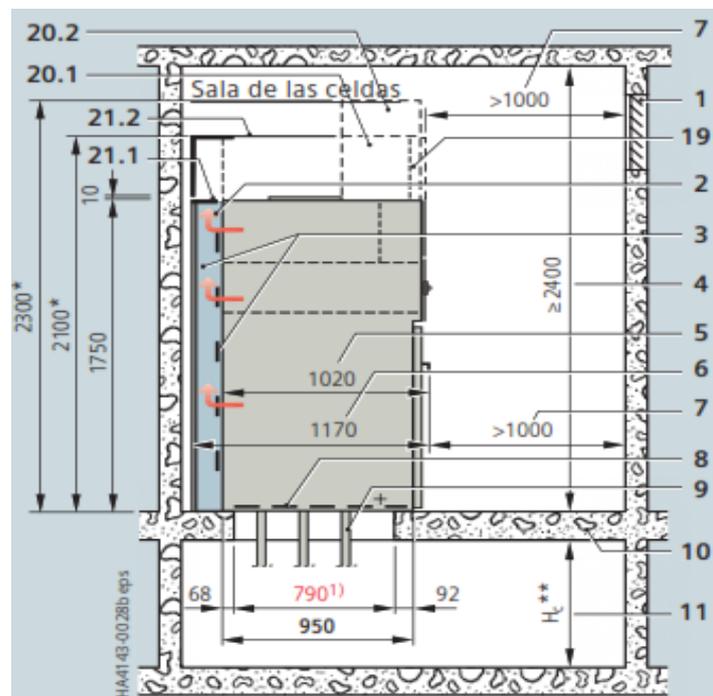


Figura 33: Montaje junto a la pared celda de media tensión tipo SIMOSEC

Fuente: Catalogo "Celdas tipo SIMOSEC"[37]

Tipo de instalación	IAC	Canal de alivio de presión en la parte trasera	Altura del conjunto de celdas en mm	Altitud recomendada para la sala de las celdas
Montaje junto a la pared	-	-	1750	≥ 2400
Montaje libre	-	- Δ)	1750	≥ 2400

Tabla 10: Dimensión de la instalación de las celdas
Fuente: Catalogo “Celdas tipo SIMOSEC”[37]

La delimitación para ubicar las celdas de media tensión y el tablero de comunicaciones en el caso de estudio, se realiza aplicando la tabla 9 y 10 como referencia para el dimensionamiento de la estructura del cuarto de control.

En la figura 34 se muestra el cuarto de control donde se ubican las celdas de media tensión y el tablero de comunicaciones, con dimensiones de 2.5 metros de alto y 9.7 metros de ancho, en donde se divide en dos compartimientos, el primero para los tableros y celdas de MT y el segundo para los bancos de baterías que se utilizan en los sistemas UPS.

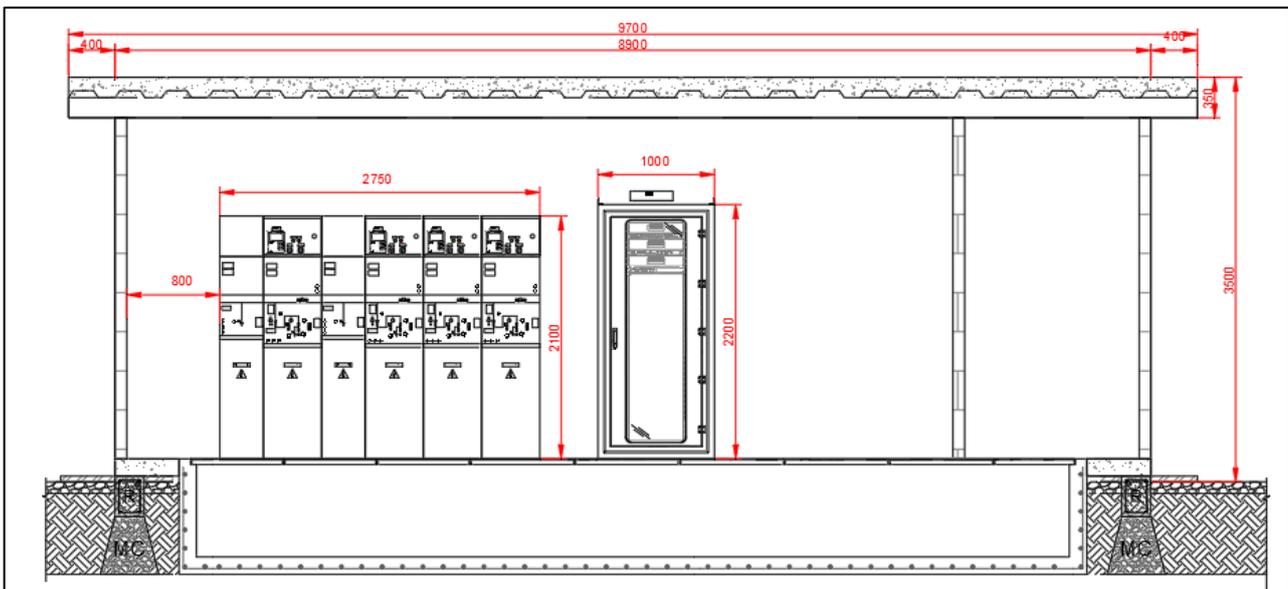


Figura 34: Ubicación frontal de las celdas de media tensión tipo SIMOSEC
Fuente: Autor

Para diseñar la instalación de las celdas de media tensión se utiliza la figura 33 como referencia para el diseño dentro de la estructura del cuarto de control, la cual se puede observar en la figura 35.

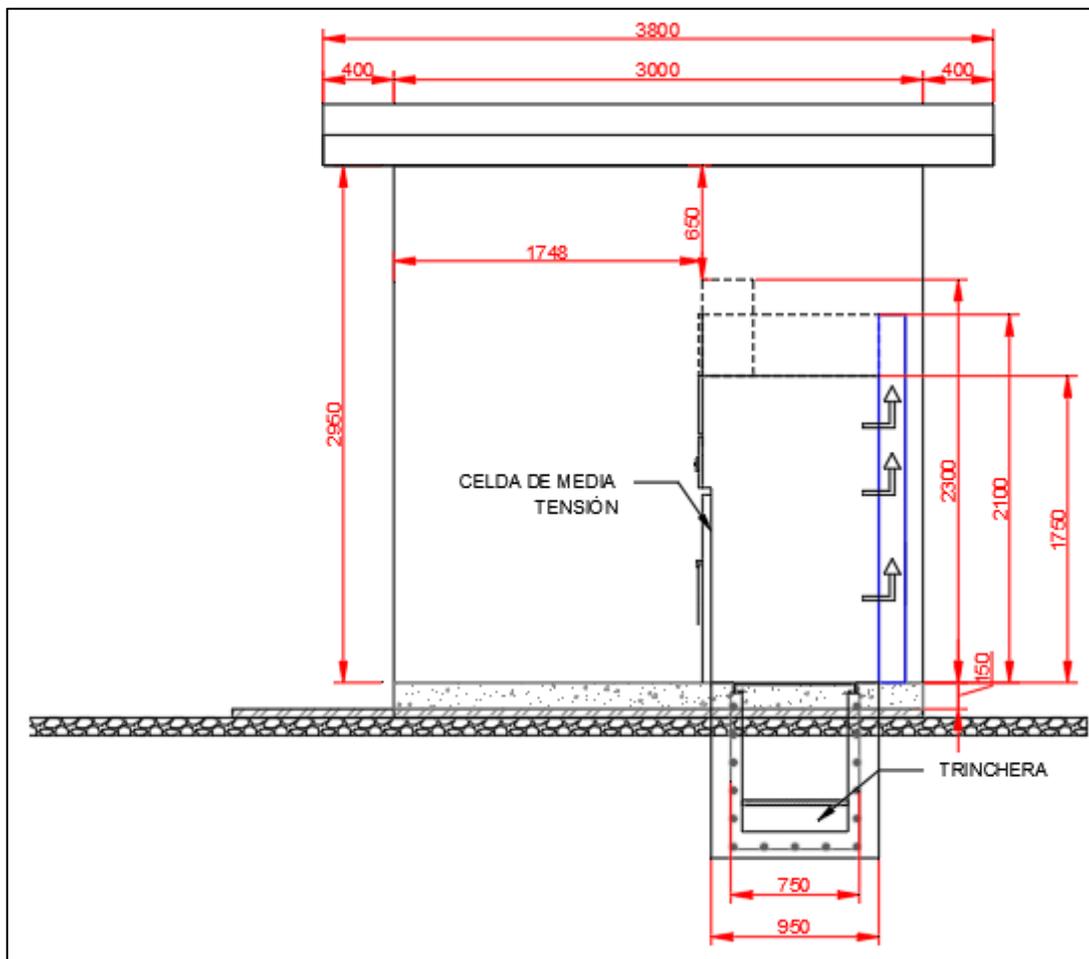


Figura 35: Vista lateral derecha celdas de media tensión tipo SIMOSEC

Fuente: Autor

Se presenta en la figura 36 la vista superior del cuarto de control detallando dimensiones constructivas para la estructura, la ubicación de los equipos en la cual, en la parte inferior se tiene la trinchera subterránea donde va la bajada de cables para la conexión de los equipos, en el anexo 4 se presenta el plano de la ubicación de las celdas MT dentro del cuarto de control.

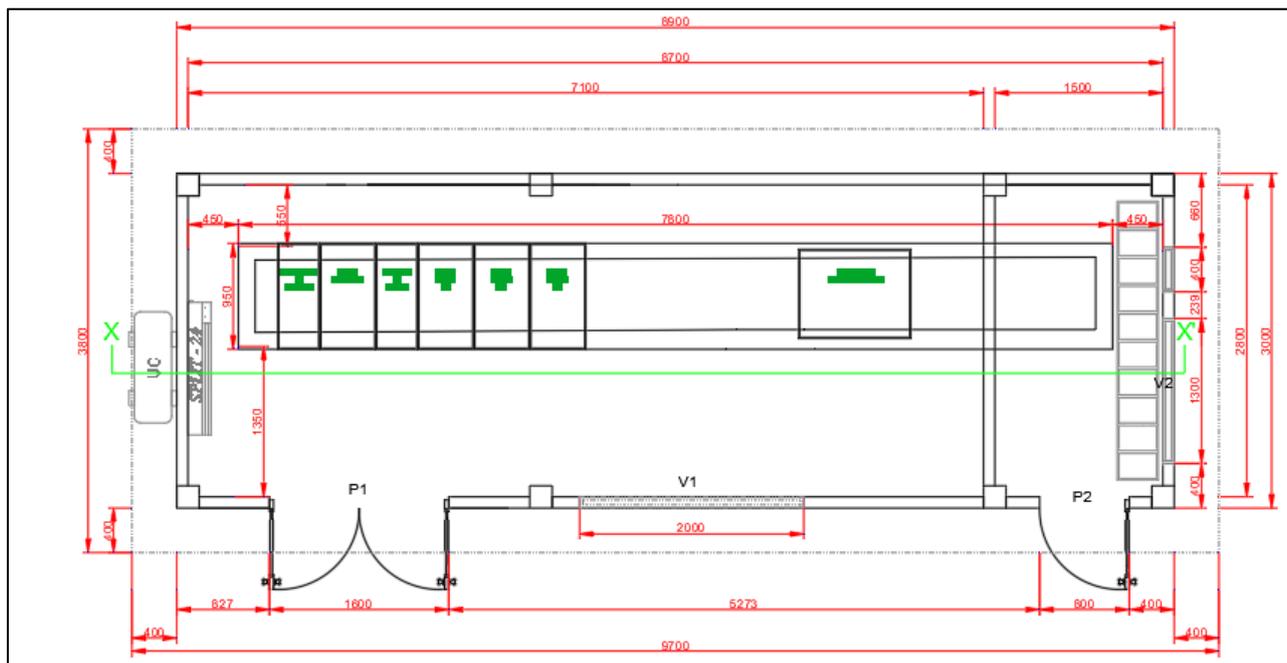


Figura 36: Vista superior del cuarto de control
Fuente: Autor

3.2 Simulación del sistema de protección

ETAP es el software de ingeniería más completo para desarrollar el diseño, análisis, simulación y evaluación de los componentes de protección de un sistema de potencia [26], permite realizar un análisis de los diversos tipos de fallas que se pueden generar.

Para presentar el análisis de la coordinación de protecciones del caso de estudio, se utiliza ETAP para la simulación del unifilar de protección con los datos técnicos de cada componente del diagrama

En la figura 37 se muestra la simulación del sistema con los componentes que ofrece ETAP para realizar el montaje del sistema eléctrico.

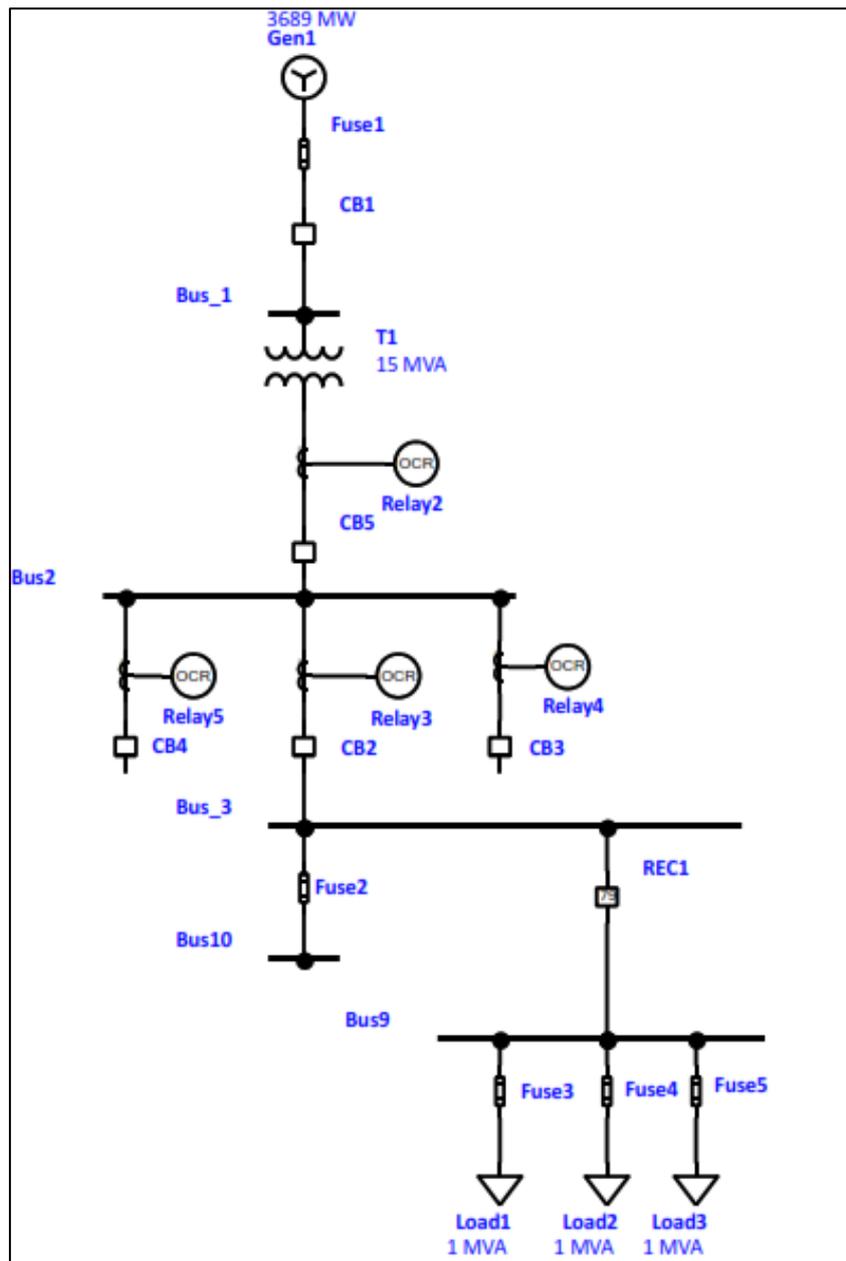


Figura 37: Simulación del sistema eléctrico
Fuente: Autor

3.2.1 Coordinación de protecciones

La coordinación de protecciones mediante el software evalúa el unifilar del sistema eléctrico donde se localizan los equipos de protecciones a través de curvas que describen la característica de la protección y permiten su ajuste directamente sobre el gráfico.[26]

La coordinación de protecciones se realiza basada en la curva de protecciones ya establecida en el caso del libro “Protective relaying” de J. Lewis Blackburn y Thomas J. Domin[4], en la figura 38 se presenta la curva de protección del sistema de distribución.

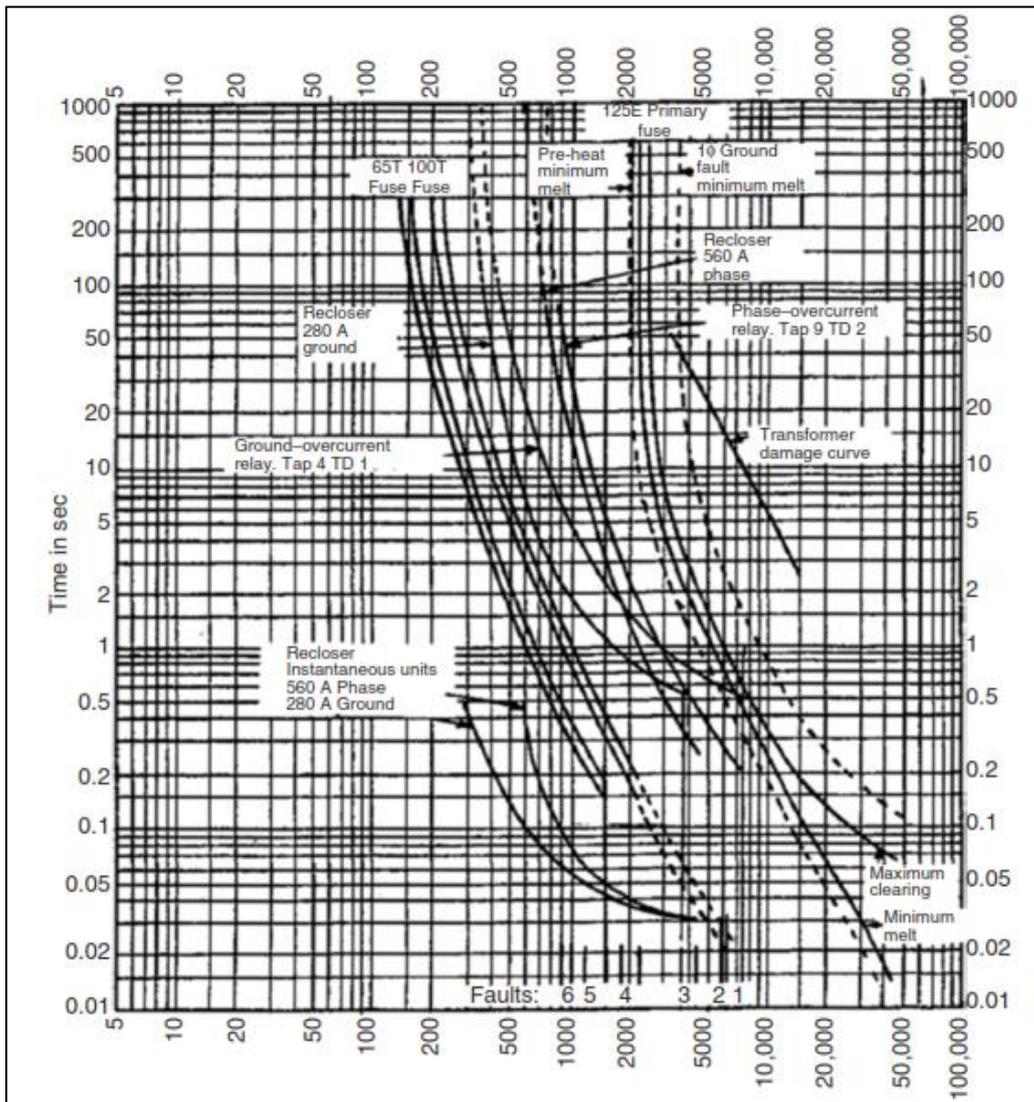


Figura 38: Curva de operación de la subestación eléctrica
Fuente: Libro "Protective Relaying" [4]

Se realiza la comparación de la curva de protecciones del sistema en la simulación en ETAP para comparar los puntos de la curva del caso y la curva de operación del simulador.

3.2.2 Curva de operación

El software ETAP permite presentar la curva de operación y protección del sistema donde señala la curva individual de cada componente, se presenta la curva de protección de los fusibles y los relés de protección SEL 751 dentro de las celdas de media tensión.

En la figura 39 se presenta la curva de operación que muestra una similitud a la curva de operación del objeto de estudio para demostrar la correcta coordinación de los dispositivos, mediante esta curva se muestra la operación de los dispositivos para proteger el sistema.

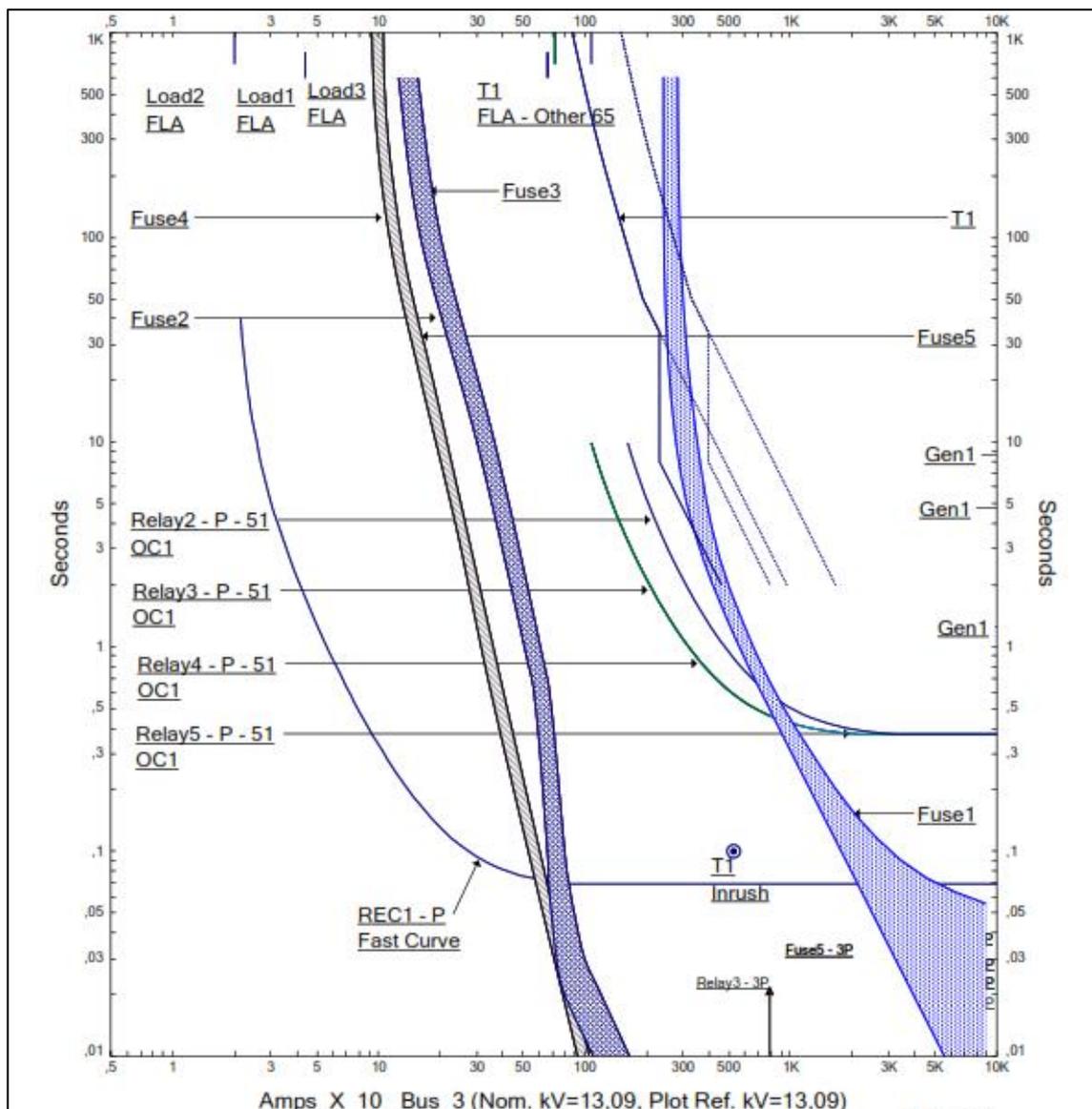


Figura 39: Curva de operación de la subestación eléctrica
Fuente: Autor

3.2.3 Simulación de fallas

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico diseñado en ETAP, se expone dos casos en donde se intercepta una falla eléctrica en el circuito y se realiza la demostración de la maniobra de protección de los equipos y el tiempo de despeje de la falla.

En la figura 40 se puede observar la simulación del primer caso de una falla localizada en la barra de 13,09 kV donde muestra un voltaje de falla de 0 kV y la corriente de interrupción en el nodo, actúa el relé 2 y manda abrir el interruptor CB1 y CB5 al mismo tiempo, como protección de respaldo actúa el fusible 1.

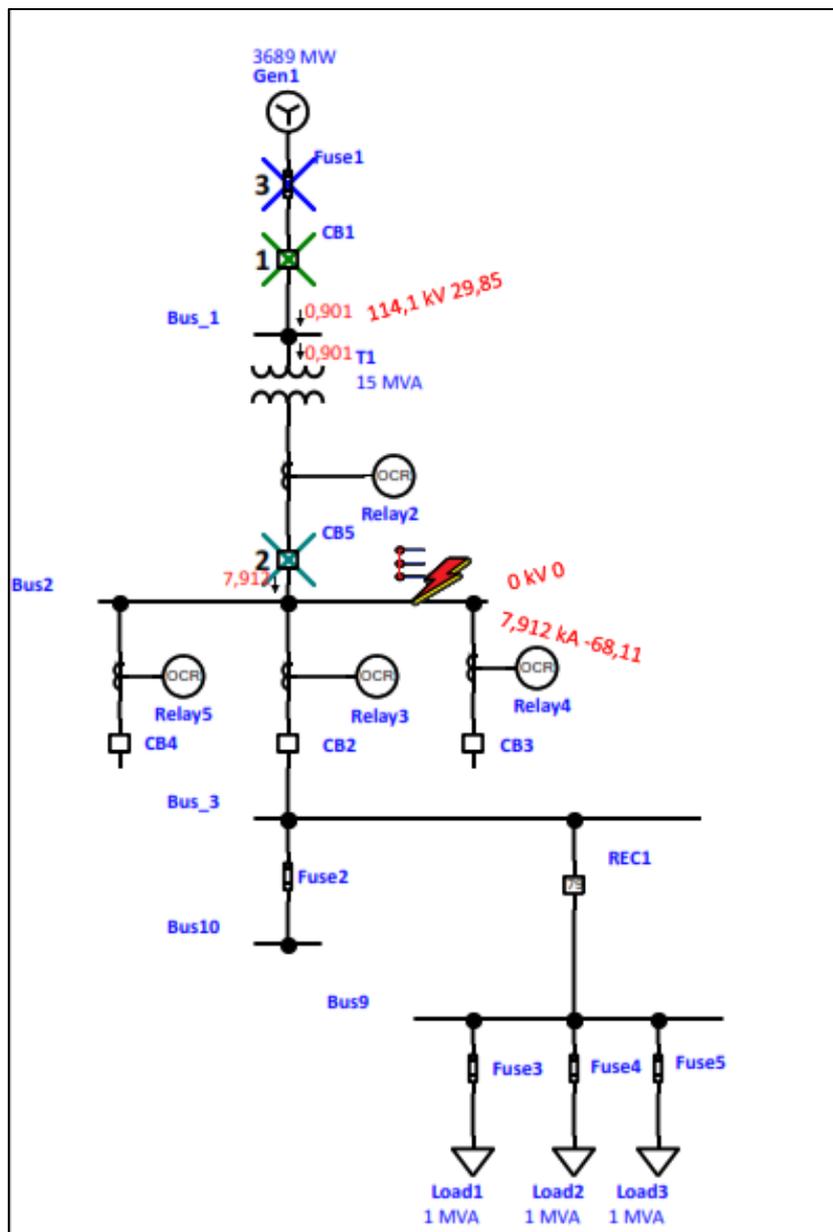


Figura 40: Falla en el bus 2

Fuente: Autor

En el reporte de la figura 41 se indica el tiempo en milisegundos en el cual realizan la maniobra de apertura los equipos principales de protección y el equipo de respaldo.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus2					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 01-18-2022	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
586	Relay2	7,912	586		Phase - OC1 - 51
669	CB1		83,3		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51
669	CB5		83,3		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51
675	Fuse1	0,901	493	675	

Figura 41: Reporte de operación caso 1
Fuente: Autor

En el segundo caso en la figura 42 presenta una falla debajo del fusible 2 con un voltaje de falla de 0 kV y el disparo de la protección principal del fusible 2 y protección de respaldo del relé 3 que manda actuar al interruptor CB2 y el relé 2 que maniobra al interruptor CB1 y CB5.

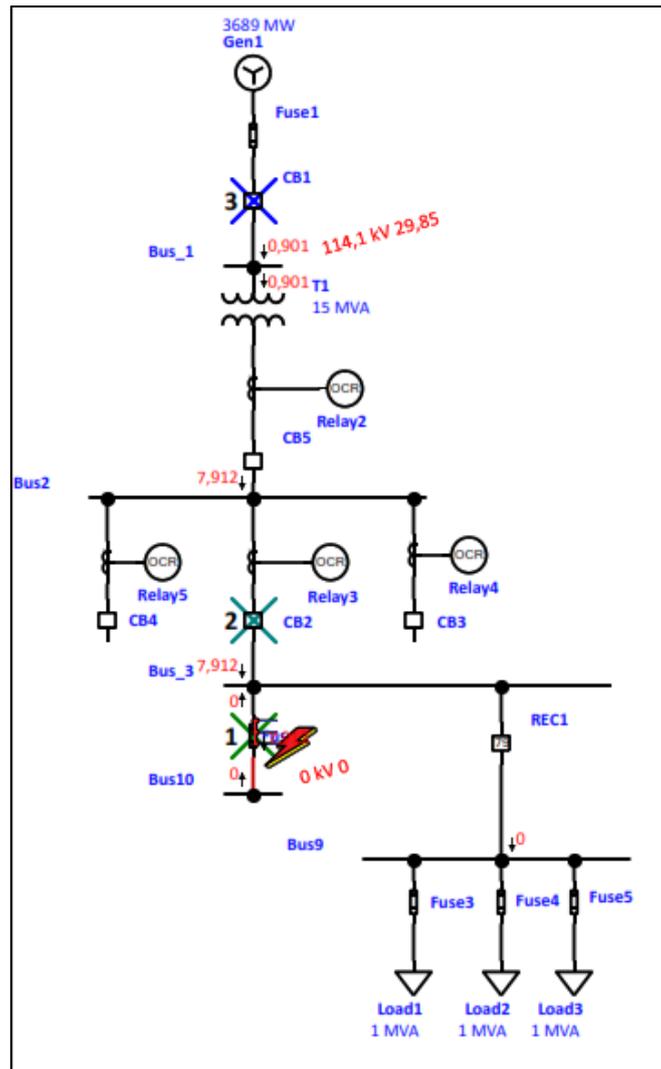


Figura 42: Falla bus 3-bus 10
Fuente: Autor

El reporte de la figura 43 muestra el tiempo de operación en el cual actuaron las protecciones en un tiempo en milisegundos en el cual realizan la maniobra de apertura los equipos.

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
3-Phase (Symmetrical) fault on connector between Bus10 & Fuse2. Adjacent bus: Bus10					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 01-18-2022	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
10,0	Fuse2	7,912	< 10,0		
459	Relay3	7,912	459		Phase - OC1 - 51
543	CB2		83,3		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 51
586	Relay2	7,912	586		Phase - OC1 - 51
669	CB1		83,3		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51
669	CB5		83,3		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51
675	Fuse1	0,901	493	675	

Figura 43: Reporte de operación caso 2
Fuente: Autor

3.2.4 Hoja de resultados

La hoja de resultados que proporciona el software ETAP indican los datos técnicos de cada componente de protección en el sistema, en el anexo 5 se muestra la hoja de resultados completa, para mostrar los datos los datos técnicos en esta sección se presenta la tabla 11.

RELAY 2	
Modelo	751
CT	600:5
Fase	
Curva	U2-inversa
Pickup (0,5-16 sec-5A)	9
Time dial	2
Neutro	
Curva	U2-inversa
Pickup	4
Time dial	1
RELAY 3-4-5	
Modelo	751
CT	400:5
Fase	
Curva	U2-inversa
Pickup (0,5-16 sec-5A)	9
Time dial	2
Neutro	
Curva	U2-inversa

Pickup	4
Time dial	1
RECONECTADOR RC1	
Voltaje de operación	13,09 kV
Corriente simétrica de falla	560 KA
Corriente máxima	230 A
FUSIBLE 1	
Marca	S&C
Modelo	SMD-2B
Velocidad	Estándar
Tamaño	125 E
Voltaje	145 Kv
Corriente	125 A
Corriente de interrupción	8,750 kA
FUSIBLE 2-3	
Marca	Bussmann
Modelo	JJS
Velocidad	Muy rápido
Tamaño	100 A
Voltaje	13,09 kV
Corriente	100 A
Corriente de interrupción	200 kA
FUSIBLE 4-5	
Marca	Edison
Modelo	TJS
Velocidad	Muy rápido
Tamaño	70 A
Voltaje	13,09 kV
Corriente	70 A
Corriente de interrupción	200 kA

Tabla 11: Datos técnicos

Fuente: Autor

3.3 Sistema de comunicación SCADA

3.3.1 Arquitectura SCADA

El sistema de comunicación se realiza por medio de la conexión de los dispositivos de comunicación y los equipos controladores para recibir las señales e inspecciona el funcionamiento de estos, da la comodidad al cliente de una supervisión local o remota. Para ejecutar esta acción se crea un esquema a través de dispositivos que componen el hardware que son integrados para la supervisión mediante un software de comunicación indicado en la figura 44.

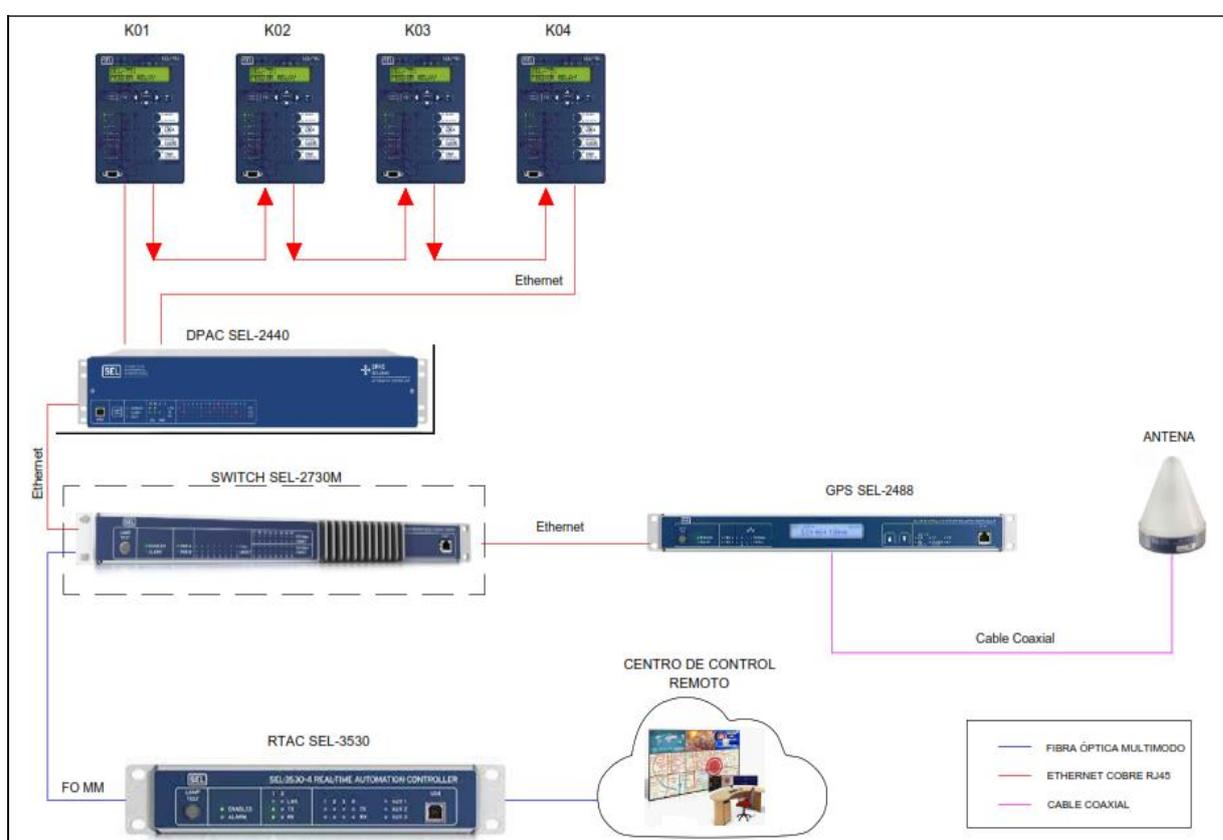


Figura 44: Arquitectura SCADA

Fuente: Autor

El ethernet Switch se interconectará a los dispositivos mediante un módulo DPAC que proporciona entradas y salidas analógicas para la conexión de los equipos de protección SEL 751 de las celdas de media tensión, a su vez estará enlazado con el RTAC que será el encargado de controlar las señales de los dispositivos y transmitir las a un monitor remoto, al conectar un GPS y una antena se envían las señales de red en tiempo real y preciso de la sincronización del sistema.

3.3.2 Característica de los equipos de comunicación

En el diseño del tablero de comunicaciones, emplea la metalmecánica en medidas estándar usadas en el mercado de 2 metros de largo y 1 metro de ancho según el NEC [38], dentro se localizan los dispositivos que conforman el sistema Scada que se indican en la figura 45 y dentro del anexo 6 se presenta el plano del tablero de comunicaciones.

Los dispositivos que se encuentran en la parte interna del tablero son:

- Modulo DPAC SEL-2440: Es el dispositivo encargado de realizar la conexión el Switch SEL 2730M a los equipos de protección programables en el interior de las celdas, gracias a sus entradas y salidas analógicas.
- Switch SEL-2730M: Es el encargado de interconectar las señales de los equipos de protección al RTAC SEL-3530 para realizar la comunicación al usuario.
- GPS SEL-2488: Es el reloj satelital que realiza la verificación y sincronización de las señales del sistema en el tiempo, para la comunicación al usuario.
- RTAC SEL-3530: Es el equipo de comunicación que realiza el control, supervisión y comunicación del sistema para convertir los datos entre varios protocolos de cualquier dispositivo conectado para remitir las señales al usuario de manera local o remota.

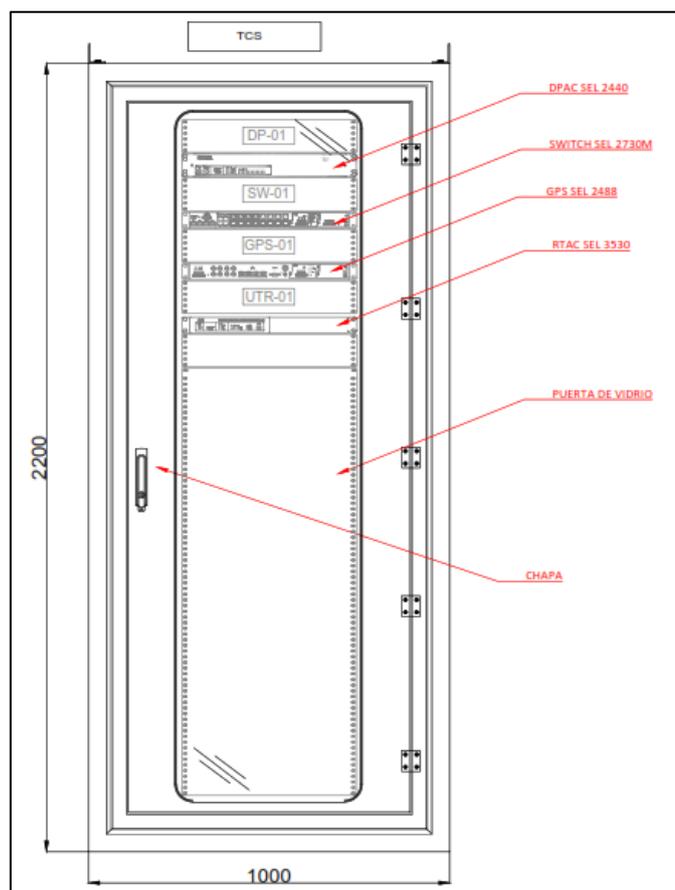


Figura 45: Tablero de comunicación

Fuente: Autor

3.3.3 Listado de señales lógicas

En esta sección se presenta en la tabla 12, las señales de comunicación que van a ser monitoreadas en la interfaz de comunicación receptadas por los dispositivos de comunicación transmitidas por los equipos de protección conectados al sistema.

SEÑALES LOGICAS						
Subestación	IED Receptor	Modelo Receptor	Nivel de Voltaje	Bahía	VirtualBit	Descripción de la señal
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB001	51P1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB002	51P1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB003	51P1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB004	51P1TD - Procedente del cubículo K02
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB005	51P1TD- Procedente del cubículo K03
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB006	51P1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB007	51N1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB008	51N1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB009	51N1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB010	51N1TD - Procedente del cubículo K02
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB011	51N1TD- Procedente del cubículo K03
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB012	51N1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB013	Falla GOOSE-K02
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB014	Falla GOOSE-K03
S/E	K01	SEL-751	145 KV	Línea 1	VB015	Falla GOOSE-K04
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB001	51P1P - Procedente del cubículo K01
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB002	51P1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB003	51P1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB004	51P1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB005	51P1TD- Procedente del cubículo K03
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB006	51P1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB007	51N1P - Procedente del cubículo K01
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB008	51N1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB009	51N1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB010	51N1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB011	51N1TD- Procedente del cubículo K03
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB012	51N1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB013	Falla GOOSE-K01
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB014	Falla GOOSE-K03
S/E	K02	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB015	Falla GOOSE-K04
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB001	51P1P - Procedente del cubículo K01
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB002	51P1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB003	51P1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB004	51P1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB005	51P1TD- Procedente del cubículo K02
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB006	51P1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB007	51N1P - Procedente del cubículo K01

S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB008	51N1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB009	51N1P - Procedente del cubículo K04
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB010	51N1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB011	51N1TD- Procedente del cubículo K02
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB012	51N1TD - Procedente del cubículo K04
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB013	Falla GOOSE-K01
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB014	Falla GOOSE-K02
S/E	K03	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB015	Falla GOOSE-K04
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB001	51P1P - Procedente del cubículo K01
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB002	51P1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB003	51P1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB004	51P1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB005	51P1TD- Procedente del cubículo K02
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB006	51P1TD - Procedente del cubículo K03
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB007	51N1P - Procedente del cubículo K01
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB008	51N1P - Procedente del cubículo K02
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB009	51N1P - Procedente del cubículo K03
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB010	51N1TD - Procedente del cubículo K01
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB011	51N1TD- Procedente del cubículo K02
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB012	51N1TD - Procedente del cubículo K03
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB013	Falla GOOSE-K01
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB014	Falla GOOSE-K02
S/E	K04	SEL-751	13,09 KV	Línea 2	VB015	Falla GOOSE-K03

Tabla 12: Señales lógicas

Fuente: Autor

3.3.4 Interfaz de operación para la comunicación de dispositivos

En base a la tesis de “Diseño y Análisis de un SCADA para el módulo de sistema de distribución del laboratorio de protecciones de la Universidad Politécnica Salesiana, empleando ACCELERATOR RTAC” de Gabriel Cortez y Chris Vargas [30], se logra analizar el funcionamiento del software para configurar los equipos SEL en la arquitectura de comunicaciones de la subestación eléctrica.

Se presenta el software como modelo para realizar la configuración HMI del sistema SCADA ya que dentro del diseño de la arquitectura de red se utilizan equipos SEL y principalmente el dispositivo RTAC que realiza los ajustes directos con el programa para el monitoreo de las señales de los equipos de protección.

La figura 46 muestra la pantalla de la configuración HMI del relé SEL 751, como ejemplo del IED de protección dentro de las celdas, en el cual el software va juntar la información de la configuración de las entradas y salidas del equipo que van a ser monitoreadas en el SCADA.

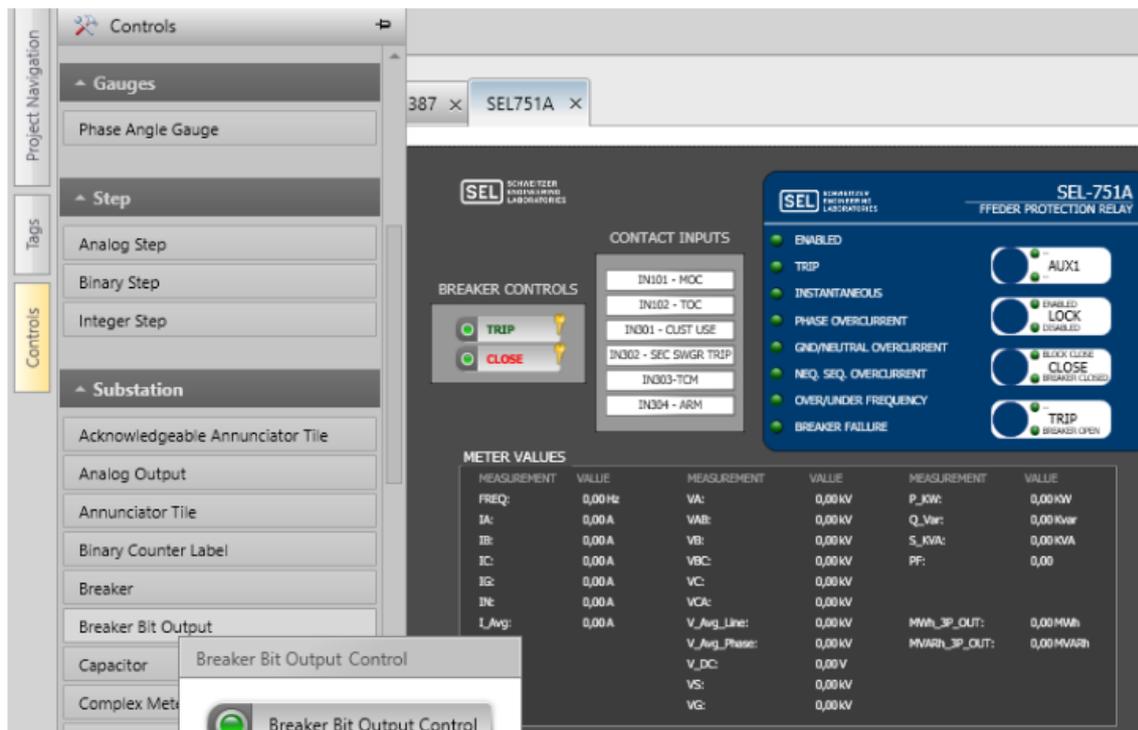


Figura 46: Configuración HMI del relé SEL 751

Fuente: Tesis "Diseño y Análisis de un SCADA para el módulo de sistema de distribución del laboratorio de protecciones de la Universidad Politécnica Salesiana, empleando ACSELERATOR RTAC"[30]

Se utiliza el dispositivo RTAC por la facilidad de obtención de las señales lógicas de los dispositivos en tiempo real, que adiciona estabilidad en diseño del sistema de protección.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados constructivos de las celdas de media tensión

Para exponer los resultados se toma como referencia el punto 3.1 planteamiento del caso y las tablas 8 y 9 donde se presenta los datos técnicos proporcionados por el software SIMARIS para la construcción de las celdas de media tensión.

La tabla 13 indica los parámetros de energía en los cuales van a trabajar las celdas de media tensión y el tipo de norma en la cual se basa para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de los equipos. Según el catálogo la tensión de la celda de distribución secundaria SIMOSEC es de 17,5 kV con una corriente del embarrado de 630A para emplear en la tensión utilizada en el caso de estudio 13,09 kV y una corriente del embarrado de 330A.

Datos técnicos	
Tipo de instalación	SIMOSEC
Estándar	IEC
Tensión asignada [kV]	17,5
Tensión de empleo [kV]	13,09
Frecuencia Asignada	60
Corriente asignada en servicio continuo, embarrado [A]	630

Tabla 13: Datos técnicos de las celdas de media tensión

Fuente: Autor

La tabla 14 proporciona los datos de fabricación de las celdas de MT según el tipo de celda SIEMENS que tiene dimensiones estandarizadas para la construcción del armazón, se emplea como tipo de instalación libre, ya que puede de las medidas del cuarto de control y el cliente. En la figura 31 el autor detalla el tipo de instalación de pared ya que es la más utilizada en subestaciones eléctricas.

Datos de fabricación	
Tipo de instalación	Libre
Dimensiones exteriores	
Ancho total [mm]	2750
Altura [mm]	2100
Profundidad [mm]	1230

Tabla 14: Datos de fabricación de las celdas de media tensión

Fuente: Autor

La tabla 15 muestra los estándares IEC que se utilizan para la fabricación de las celdas de media tensión para evidenciar la correcta configuración y construcción de las celdas de media tensión de manera mecánica y eléctrica.

Estándar IEC	
Normas de los dispositivos de conmutación de alta tensión	62271-1
Clases de protección por carcasa (código IP)	60529
Coordinación de aislamiento	60071
grado de pureza técnica para su uso en recursos de fabricación eléctrica para el nuevo SF6	60376
Cuadros de distribución de corriente alterna con revestimiento metálico tensiones nominales: >1 kV < 52 kV	62271-200
Grados de protección de las carcasas de los equipos eléctricos contra los impactos mecánicos externos	62262

Tabla 15: Datos de fabricación de las celdas de media tensión

Fuente: Autor

La información técnica constructiva nos indica que se ejecutó el correcto dimensionamiento de las celdas de media tensión con los estándares respectivos para funcionar en el sistema eléctrico del caso de estudio.

4.2 Resultado de la simulación del sistema de protección

Para evidenciar la correcta coordinación de los equipos de protección y probar que el sistema en el caso de estudio puede funcionar correctamente, se realiza la comparación de la curva de protecciones del libro “Protective relaying” de J. Lewis Blackburn y Thomas J. Domin [4] y la curva de ajuste del software ETAP para comparar los puntos de la curva del caso y la curva de operación del simulador.

En la figura 47 y figura 48, la curva de operación del caso de estudio señala puntos de operación del Fusible 125 E, 100 T, 65 T y los relés electromecánicos de protección de la salida de distribución.

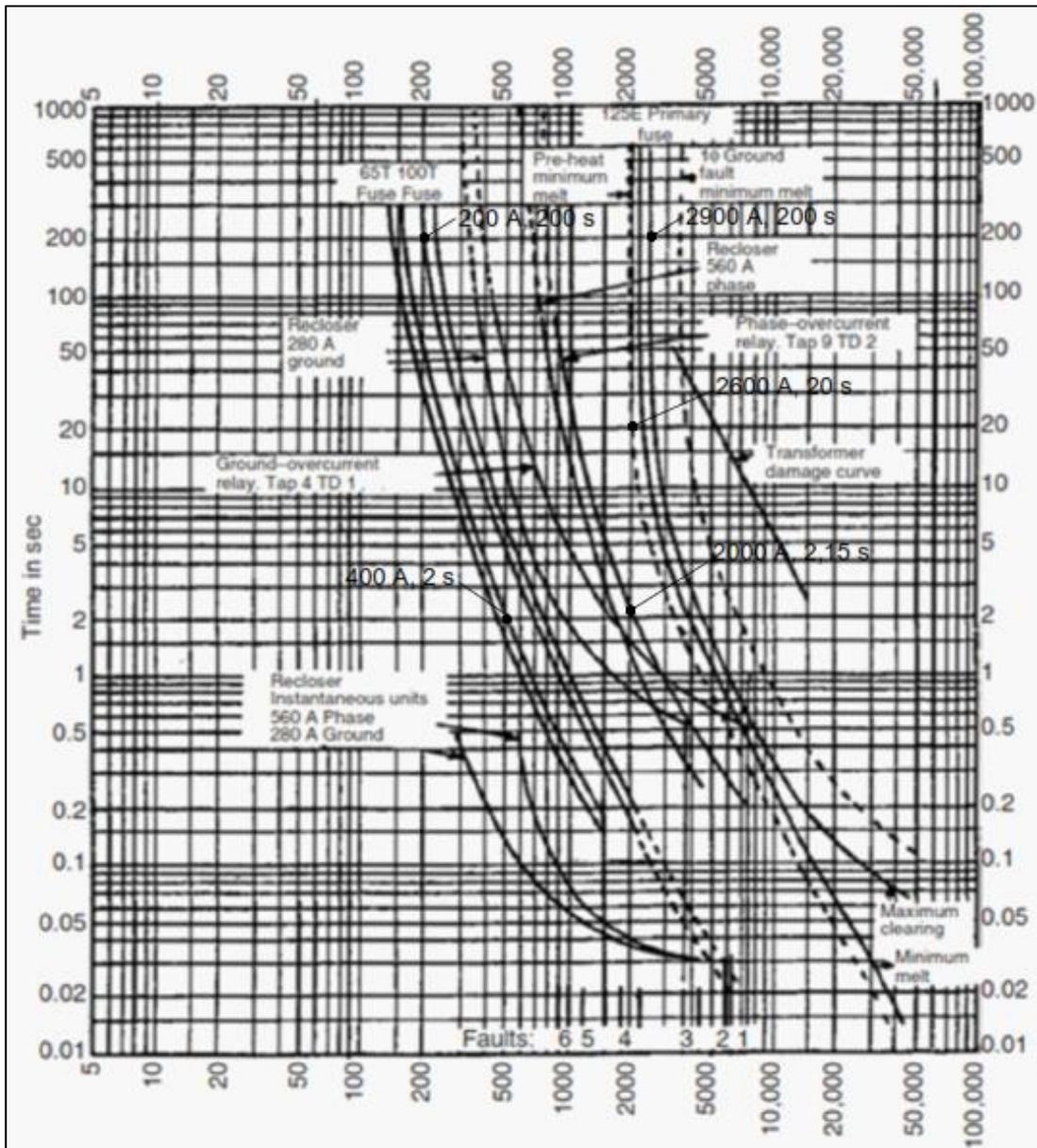


Figura 47: Puntos en la curva de operación
Fuente: Libro "Protective Relaying" [4]

Se realiza una comparación mediante puntos de inserción entre la curva del caso de estudio y la curva del sistema eléctrico en ETAP, para mostrar si se asemejan los ajustes de los dispositivos de protección en el sistema.

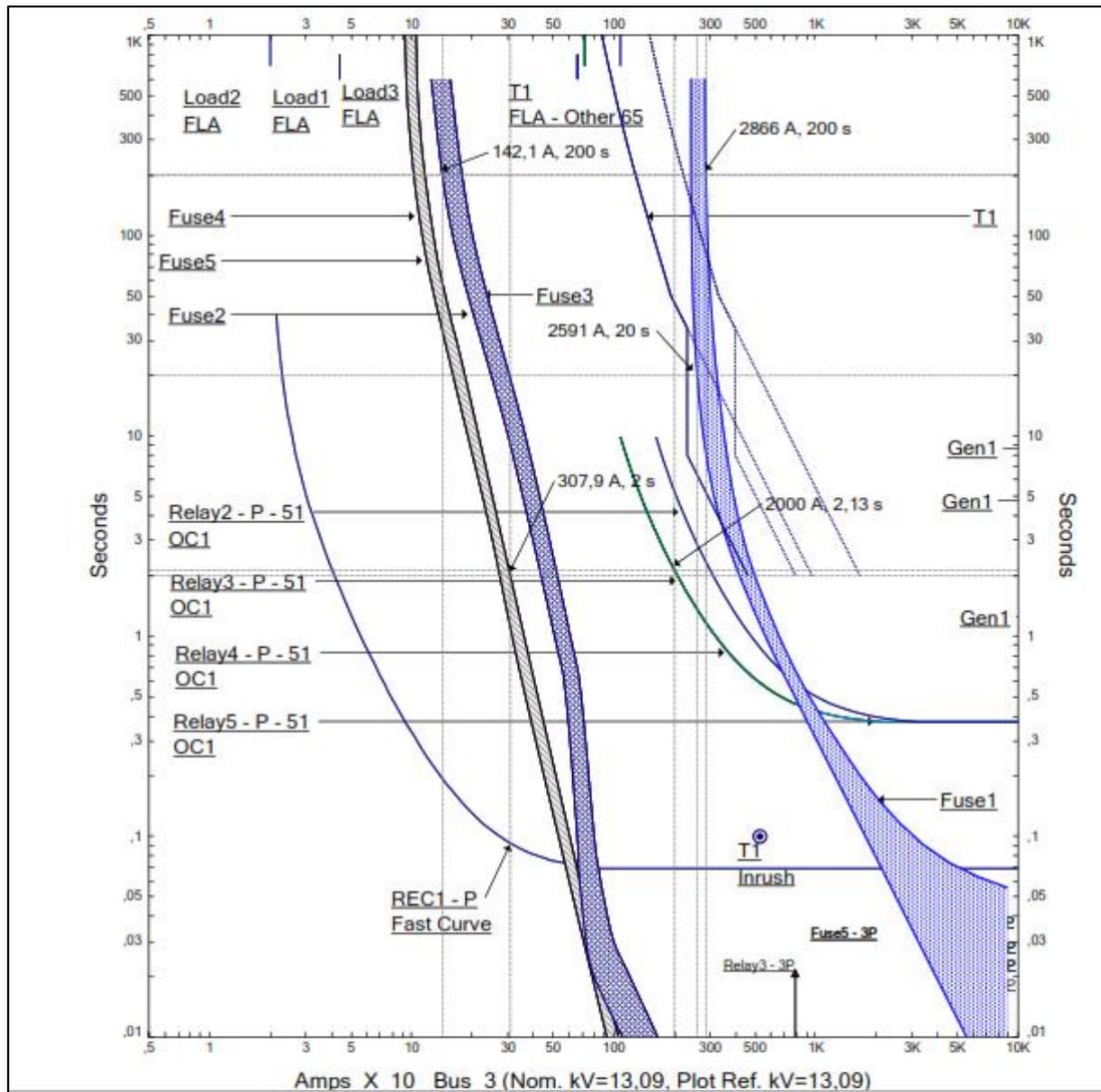


Figura 48: Puntos en la curva de operación ETAP
Fuente: Autor

En el análisis de coincidencia de puntos de intervención en la tabla 16, indican un ligero margen de diferencia en la curva de operación de los dispositivos, tomando en cuenta que en el caso de estudio la curva no incluye todos los puntos de intersección, se incrementa la diferencia en las curvas de los fusibles 100T y 65T ya que en el software ETAP cuenta con una biblioteca de equipos de diversas marcas, modelos y tipos, en el caso de los fusibles antes mencionados se seleccionó un modelo que se aproxime a igualar a la curva de operación del caso.

Curva caso de estudio	Curva de simulación ETAP
Relay overcurrent (2000 A, 2.15 s)	Relay 3-4-5 overcurrent (2000 A, 2.13 s)
Fusible 125 E 1Ø Pre-heat minimum melt (2900 A, 200 s)	Fusible 125 E 1Ø Pre-heat minimum melt (2866 A, 200 s)
Fusible 125 E Pre-heat minimum melt (2600 A, 20 s)	Fusible 125 E Pre-heat minimum melt (2591 A, 20 s)
Fusible 100 T (200 A, 200 s)	Fusible 100 T (142,1 A, 200 s)
Fusible 65 T (400 A, 2 s)	Fusible 70 T (307.9 A, 2 s)

Tabla 16: Puntos en la curva de operación

Fuente: Autor

Como conclusión la coordinación de protecciones de los equipos reflejados en la curva de operación es acorde con la información que se presenta en el caso de estudio, el margen de error entre los puntos de la curva es de 3%, la información de la hoja de resultado en la tabla 11, donde presentan los parámetros de funcionamiento de los dispositivos en el sistema y se compara con el punto 3.1 planteamiento del caso, los dispositivos son correctamente ajustados con la información proporcionada por el caso a excepción del fusible 65T que se modifica en el software de simulación con un fusible 70T.

4.3 Evaluación de la simulación de las fallas en el sistema

Para evaluar el despeje de fallas del circuito de protección, se utiliza como referencia de la figura 40 a la figura 43 para exponer la información de los casos de prueba, en el primer caso se generó una falla eléctrica en la barra de 13,09 kV, en el cual la corriente de falla es 7,912 kA donde actúa como protección principal el relé 2 que dispara y abre los interruptores CB1 y CB5 para proteger el transformador de poder, como protección de respaldo actúa el fusible 1 en caso de que la protección principal no funcione.

En la tabla 17 se indica el tiempo de disparo de los equipos de protección.

IED's	Tiempo (ms)	Condiciones
Relé 2	586 ms	Fase-OC1-51
CB1	669 ms	Disparo del relé 2-Fase-OC1-51
CB5	669 ms	Disparo del relé 2-Fase-OC1-51
Fusible 1	675 ms	

Tabla 17: Tiempo de disparo de IED's de protección caso 1

Fuente: Autor

El segundo caso de prueba se produce una falla en la línea que conecta al bus 10, la corriente de falla es de 7,912 kA, la protección principal es la apertura del fusible 2 y como protección de respaldo en caso de que no realice la maniobra de despeje la primera protección, actúa el relé 3 que dispara y abre el interruptor CB2, si por alguna razón ninguna de las protecciones antes mencionadas realizan la función de despeje, se establece como protección secundaria de respaldo el relé 2 que dispara y abre los interruptores CB1 y CB5.

En la tabla 18 muestra el tiempo de disparo de los equipos de protección.

IED's	Tiempo (ms)	Condiciones
Fusible 2	10 ms	
Relé 3	459 ms	Fase-OC1-51
CB2	543 ms	Disparo del relé 3-Fase-OC1-51
Relé 2	586 ms	Fase-OC1-51
CB1	669 ms	Disparo del relé 2-Fase-OC1-51
CB5	669 ms	Disparo del relé 2-Fase-OC1-51
Fusible 1	675 ms	

Tabla 18: Tiempo de disparo de IED's de protección caso 1

Fuente: Autor

La simulación concluye el funcionamiento adecuado del sistema de protección para el despeje de fallas eléctricas en el sistema eléctrico del caso de análisis, para una mayor rapidez del disparo de la protección por medio del relé se debe realizar el correcto cálculo del tiempo de disparo.

4.4 Evaluación de las señales de comunicación

Se evalúan las señales lógicas que van a ser supervisadas en la interfaz de comunicación, para diseñar la arquitectura SCADA se utiliza el protocolo para la comunicación de subestaciones IEC-61850 dentro de este se utiliza el GOOSE que es la mensajería instantánea para compartir información, que se indica en la tabla 12 además de las señales que reciben los dispositivos de comunicación para monitorear y alertar al usuario, muestra las señales de los equipos de protección en su ajuste de comunicación entre los IED's.

En la tabla 19 muestra las funciones monitoreadas de disparo de los relés de protección 751, en su configuración las funciones de fase máxima de sobrecorriente de tiempo:

51PIP	Disparo de la fase (0.50-16 A)
51P1TD	Tiempo de despeje (0.50-15 s)

Tabla 19: funciones de fase máxima de sobrecorriente de tiempo

Fuente: Autor

En la tabla 20 señala las funciones de sobrecorriente de tiempo en neutro:

51N1P	Disparo de la fase (0.50-16 A)
51N1TD	Tiempo de despeje (0.50-15 s)

Tabla 20: funciones de sobrecorriente de tiempo en neutro

Fuente: Autor

Como resultado obtenemos el listado de señales de entradas y salidas de los relés que son monitoreados dentro del sistema de protección.

CONCLUSIONES

- Se planteo un caso de estudio tomando como referencia el libro “*Protective relaying*” de J. Lewis Blackburn y Thomas J. Domin [4] en el cual se evaluó el sistema de protección a implementar en celdas de media tensión empleando el programa ETAP.
- Al utilizar el software SIMARIS y AutoCAD se seleccionó la estructura metálica y configuración interna de las celdas de media tensión para la aplicación en el sistema de protección.
- Acorde a la simulación de fallas en el programa ETAP, se demostró mediante el análisis de fallas en distintos puntos en las barras, el correcto funcionamiento del equipo de protección en cuanto al despeje de anomalías con los resultados del tiempo de disparo en un margen mínimo de 10 ms en el cual actúan los fusibles de protección y el relé de protección en rango de 83,33 ms ajustado al tiempo de despeje descrito en el caso de estudio.
- Mediante la comparación de los puntos de las curvas de protecciones se determinó la correcta coordinación de cada equipo de protección, puesto que, comparten relación los resultados teóricos frente a los resultados obtenidos con un margen de error del 3% a través de simulación en el software ETAP.
- Se diseño el sistema de comunicación SCADA para garantiza al usuario el control de los ajustes y monitoreo de señales de los IED’s de protección, mediante el diseño del tablero de comunicaciones y la arquitectura de los dispositivos bajo la función del programa AutoCAD.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los departamentos de ingeniería encargados en el montaje de celdas de media tensión, disponer de toda la información técnica referente a las características del proyecto y la carga a suministrar para la proyección del sistema de protección.
- Se sugiere al ingeniero diseñador, que para la elaboración del diseño de las celdas de media tensión tener en cuenta la localización, aplicación, tipo de carga, nivel de corto circuito e instalación física en la cual se ubicara el proyecto.
- Se aconseja al ingeniero diseñador, respetar las distancias de seguridad horizontales y verticales de acuerdo a la normativa ANSI o IEC, para tener el espacio suficiente para los mantenimientos futuros.
- Se recomienda que en la implementación de los sistemas de protección de celdas de media tensión que requieran de relés de protección se realicen con dispositivos microprocesadores (IED's).
- Se aconseja al ingeniero de protecciones, que para el ajuste de protecciones se realice un estudio en un programa especializado en sistemas eléctricos, para evaluar la curva de protección de los equipos y garantizar la correcta función de las celdas como en el caso analizado.
- En resolución se puede emplear este proyecto de titulación como un modelo para la elaboración de sistemas de protección en subestaciones eléctricas, que será de ventaja para los estudiantes de ingeniería eléctrica.

Bibliografía

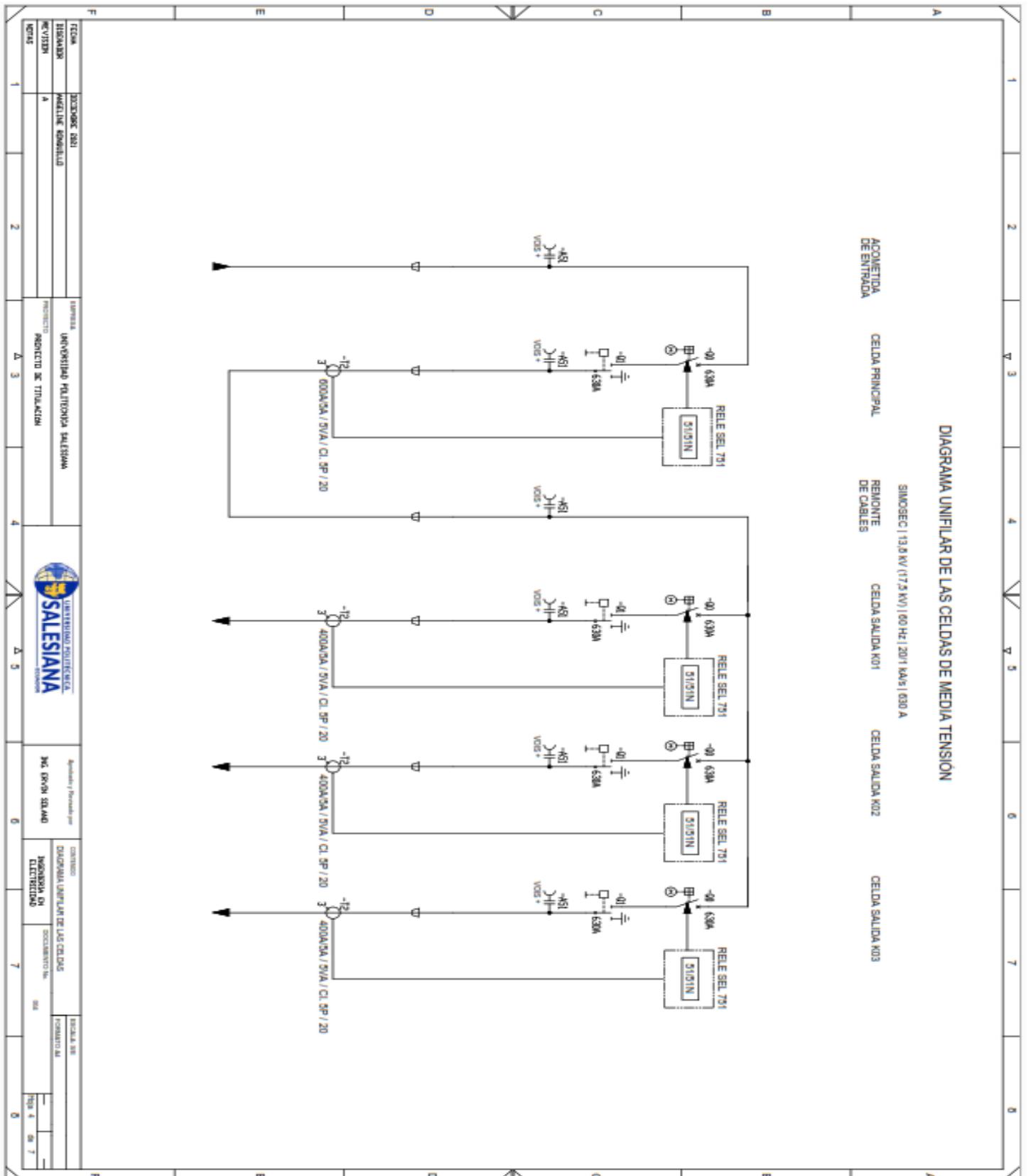
- [1] Eaton, “RVAC Professional solution, Realible power,” *Eaton*, p. 21.
- [2] M. Morales, J. Miguel, O. Campoverde, and H. Andrés, “Estudio para la coordinación de protecciones mediante selectividad lógica para los centros de fuerza de la central molino, presa Daniel Palacios y central Mazar de la empresa Celec Hidropaute,” 2012.
- [3] J. E. Ávila Ávila and J. F. Ortega Pintado, “Estudio y análisis de la coordinación de protecciones de los alimentadores 121 de la S/E 1 y 222 de la S/E 2 de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.,” *Univ. Politécnica Sales. Sede Cuenca Carrera Ing. Eléctrica.*, p. 222, 2020, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18338>.
- [4] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective relaying: Principles and applications, third edition*. 2006.
- [5] Cordova Saavedra E., “Diseño de subestaciones de transmisión de potencia convencional mediante la elaboración de una herramienta computacional en microsoft excel,” 2018.
- [6] J. D. McDonald, *Electric power substations engineering*. 2004.
- [7] ARCONEL, “Regulación No. ARCONEL 005/18: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,” *Arconel*, p. 38, 2018.
- [8] U. Distrital, F. José, and S. D. E. I. Barión, “Caracterización de subestaciones eléctricas,” *Univ. Dist. Fr. José Caldas*, p. 105, 2020.
- [9] C. Power, *Electrical Distribution- System Protection*. 2005.
- [10] M. Blasco and J. Toledano, *Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. 2009.
- [11] J. Trashorras, *Desarrollo de redes electricas y centros de transformación*. 2013.
- [12] J. Garcia, *Instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. 2010.
- [13] M. Tosatado, “Celdas de media tensión,” p. 31, 2009, [Online]. Available: <http://www.emagister.com/curso-energia-centros-transformacion/celdas-media-tension-clasificacion-segun-funcion>.
- [14] SDA, “Uso de SF6 en los equipos eléctricos,” pp. 1–7, 2015.
- [15] S. Technology, “Aplicaciones del SF6 en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente,” *Ingeniería*, vol. 16, no. 3, pp. 229–241, 2012.
- [16] C. Quintana, “Soluciones Celdas GIS,” 2017.

- [17] C.- Hammer, “Celdas secundarias de media tensión con corte en vacío,” pp. 18–19, 2017.
- [18] Legrand, “Celdas de media tensión,” 2015.
- [19] S. Ag, “Low and medium voltage systems and solutions,” 2014.
- [20] ABB, “SafeRing / SafePlus 12-24kV Gas-insulated ring main unit SafeRing and Compact switchgear SafePlus,” 2021.
- [21] J. Cervantes, “Protección en sistemas eléctricos,” *Univ. Auton. Nuevo Leon*, p. 241, 2000.
- [22] A. Grid, *Network Protection & Automation Guide Network Protection & Automation Guide*. 2017.
- [23] J. Figueroa, “Protección de Sistemas Eléctricos,” *Inst. Univ. Politécnico “Santiago Mariño,”* p. 173.
- [24] C. Travez, “DIRECCIONALIDAD BASADA EN PATRONES OBTENIDOS MEDIANTE LA TRANSFORMADA WAVELET PARA UN RELÉ DE SOBRECORRIENTE INSTALADO EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN,” 2017.
- [25] SEL, “SEL-751 Relay Feeder Protection Relay,” 2020.
- [26] S. Mendieta, “Manual para el uso de las herramientas basicas del software ETAP,” *Univ. la Salle*, p. 90, 2015, [Online]. Available: <https://ciencia.lasalle.edu.co/optometria%0ACitación>.
- [27] D. A. Zapata, “Desarrollo de un sistema SCADA para uso en pequeñas y medianas empresas,” *Univ. Piura*, p. 92, 2013.
- [28] R. Carlos, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS,” *Univ. Católica Valparaíso*, p. 74, 2017.
- [29] S. Jessica, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA LA CAPACITACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA EMPRESA SISELEC S.A UTILIZANDO EL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN IEC 61850 PARA LA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SCADA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA BÁSICA,” *Univ. Politécnica Sales.*, p. 162, 2018.
- [30] G. Eduardo, C. Muñoz, C. Enrique, and V. Ballesteros, “Diseño y Análisis de un SCADA para el módulo de sistema de distribución del laboratorio de protecciones de la Universidad Politécnica Salesiana , empleando ACSELERATOR RTAC,”

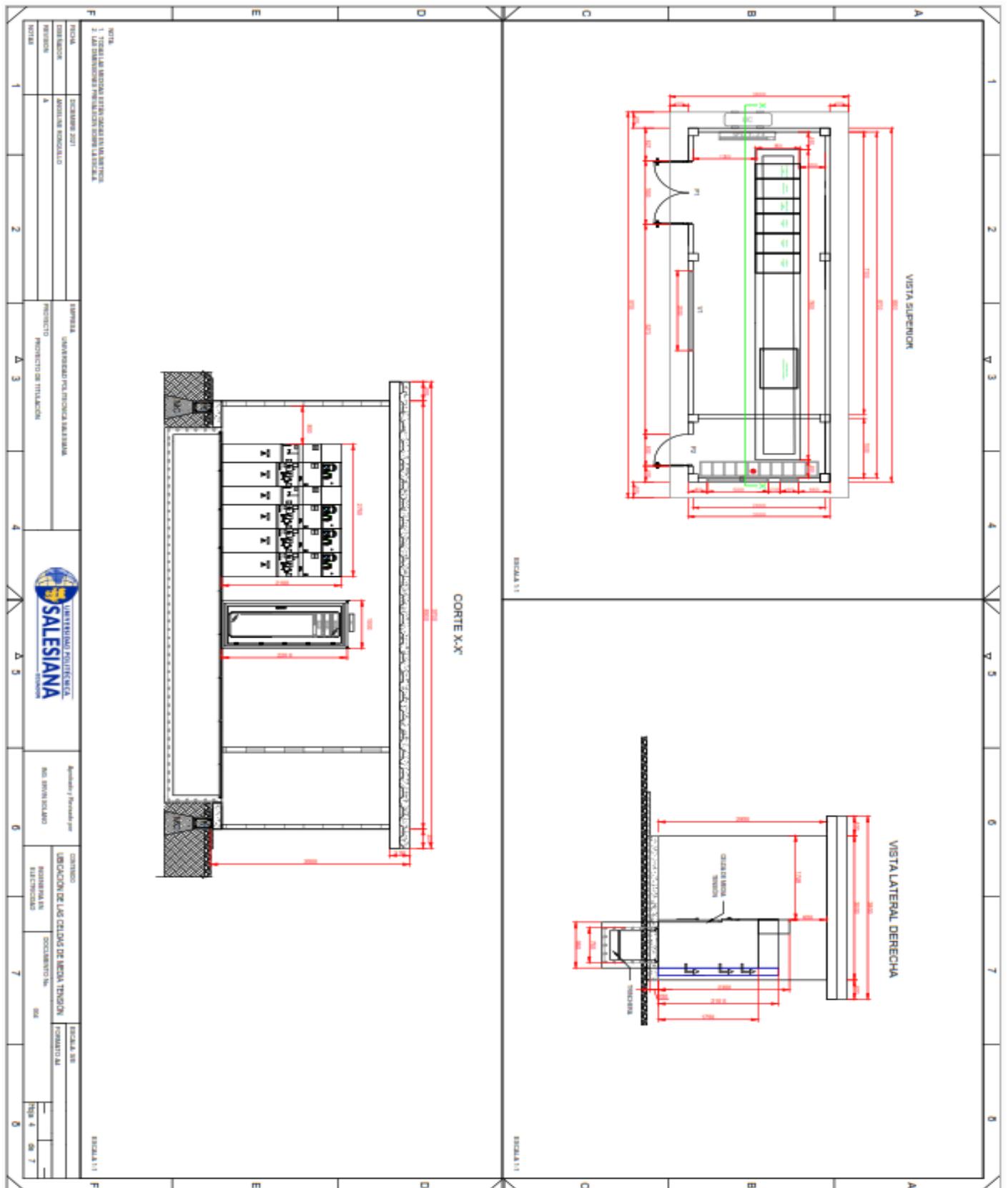
Univ. Politécnica Sales., pp. 1–51, 2021.

- [31] SEL, “SEL-3530 Automation Controller,” 2017.
- [32] C. Rosado, Maria; Peralta, Hilda; Oyague, Carlos; Sánchez, “Estudio, diseño e implementación de un bastidor para la red de comunicación de voz y datos de la facultad de jurisprudencia de la UCSG.”
- [33] SEL, “SEL-2730M 24-Port Managed Ethernet Switch,” 2018.
- [34] SEL, “SEL-2440 Discrete Programmable Automation Controller,” 2018.
- [35] SEL, “SEL-2488 Satellite-Synchronized Network Clock,” 2016.
- [36] M. W. Earley and C. D. Coache, *National electrical code*, vol. 44, no. 11. 2013.
- [37] SIEMENS, “Celdas tipo SIMOSEC,” 2017.
- [38] Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana del Ecuador, “Norma Ecuatoriana De Construcción Nec Capítulo 15 Instalaciones Electromecánicas,” *Nec*, p. 173, 2013, [Online]. Available: <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/09/NECINSTALACIONESELECTROMECHANICAS2013.pdf>.
- [39] A. Velasco, “ELECTRICA: la guía del electricista,” 34, p. 36, 2007.
- [40] SEL, “SEL-787 Transformer Protection,” 2020.
- [41] Siemens, “Low and Medium-Voltage Systems and Solutions,” 2014.

Anexo 2: Diagrama unifilar de las celdas de media tensión



Anexo 4: Ubicación de las celdas de media tensión



Anexo 5: Hoja de resultados de ETAP

Project: TESIS_ANGELINE RONQUILLO
 Location: UNIVERSIDAD POLITECNICA
 Contract:
 Engineer: ANGELINE DESIRE RONQUILLO
 Filename: PROYECTO DE TESIS

ETAP
 19.0.1C

Page: 1
 Date: 01-14-2022
 Revision: Base

Protective Device Settings

REC: REC1

MFR:	Tag #:	3-Phase kA:	4478.00	(User Defined)
Model:	Rating:	560.000 kA, 13.090 kV	LG kA:	3969.00 (User Defined)
Type:	Max. Amp	230,000	Base kV:	0.000 (User Defined)

OCR: Relay2

MFR:	Schweitzer	Tag #:			CT	Base kV	IF (kA)
Model:	751				Phase:	600:5,000	
					GND:	600:5,000	

OC Level: OC1

	Range	Setting
Phase TOC	U2 - U.S. Inverse	
	Pickup (Tap)	0,5 - 16 Sec - 5A 9.000
	Time Dial	2.000
Neutral TOC	U2 - U.S. Inverse	
	Pickup (Tap)	0,5 - 16 Sec - 5A 4.000
	Time Dial	1.000

OCR: Relay3

MFR:	Schweitzer	Tag #:			CT	Base kV	IF (kA)
Model:	751				Phase:	400:5,000	
					GND:	400:5,000	

OC Level: OC1

	Range	Setting
Phase TOC	U2 - U.S. Inverse	
	Pickup (Tap)	0,5 - 16 Sec - 5A 9.000
	Time Dial	2.000
Neutral TOC	U2 - U.S. Inverse	
	Pickup (Tap)	0,5 - 16 Sec - 5A 4.000
	Time Dial	1.000

Project: TESIS_ANGELINE RONQUILLO
 Location: UNIVERSIDAD POLITECNICA
 Contract:
 Engineer: ANGELINE DESIRE RONQUILLO
 Filename: PROYECTO DE TESIS

ETAP
 19.0.1C

Page: 2
 Date: 01-14-2022
 Revision: Base

Protective Device Settings

OCR: Relay4

MFR:	Schweitzer	Tag #:		CT	Base kV	IF (kA)
Model:	751			Phase:	400-5,000	
				GND:	400-5,000	

OC Level: OC1

		<u>Range</u>	<u>Setting</u>
Phase TOC	U2 - U.S. Inverse		
	Pickup (Tap)	0.5 - 16 Sec - 5A	9.000
	Time Dial		2.000
Neutral TOC	U2 - U.S. Inverse		
	Pickup (Tap)	0.5 - 16 Sec - 5A	9.000
	Time Dial		1.000

OCR: Relay5

MFR:	Schweitzer	Tag #:		CT	Base kV	IF (kA)
Model:	751			Phase:	400-5,000	
				GND:	400-5,000	

OC Level: OC1

		<u>Range</u>	<u>Setting</u>
Phase TOC	U2 - U.S. Inverse		
	Pickup (Tap)	0.5 - 16 Sec - 5A	9.000
	Time Dial		2.000
Neutral TOC	U2 - U.S. Inverse		
	Pickup (Tap)	0.5 - 16 Sec - 5A	4.000
	Time Dial		1.000

Fuse: Fuse1

MFR:	S&C	Tag #:		3-Phase kA:	0.00	Sym. (Calc.)
Model:	SMD-2B	kV:	145.000	LG kA:	0.00	Sym. (Calc.)
Speed:	Standard	Int. kA:	8.750	Base kV:	0.000	(Calc.)
Size:	125E	Cont. Amp:	125.000			

Fuse: Fuse2

MFR:	Bussmann	Tag #:		3-Phase kA:	6131.00	(User Defined)
Model:	JIS	kV:	0.600	LG kA:	5825.00	(User Defined)
Speed:	Very Fast	Int. kA:	200.000	Base kV:	0.000	(User Defined)
Size:	100A	Cont. Amp:	100.000			

Fuse: Fuse3

MFR:	Bussmann	Tag #:		3-Phase kA:	2215.00	(User Defined)
Model:	JIS	kV:	0.600	LG kA:	910.00	(User Defined)
Speed:	Very Fast	Int. kA:	200.000	Base kV:	0.000	(User Defined)
Size:	100A	Cont. Amp:	100.000			

Project: TESIS_ANGELINE RONQUILLO
 Location: UNIVERSIDAD POLITECNICA
 Contract:
 Engineer: ANGELINE DESIRE RONQUILLO
 Filename: PROYECTO DE TESIS

ETAP
 19.0.1C

Page: 3
 Date: 01-14-2022
 Revision: Base

Protective Device Settings

Fuse: Fuse4					
MFR:	Edison	Tag #:		3-Phase kA:	1423.00 (User Defined)
Model:	TJS	kV:	0.600	LG kA:	1187.00 (User Defined)
Speed:	Very Fast	Int. kA:	200.000	Base kV:	0.000 (User Defined)
Size:	70	Cont. Amp:	70.000		

Fuse: Fuse5					
MFR:	Edison	Tag #:		3-Phase kA:	1074.00 (User Defined)
Model:	TJS	kV:	0.600	LG kA:	910.00 (User Defined)
Speed:	Very Fast	Int. kA:	200.000	Base kV:	0.000 (User Defined)
Size:	70	Cont. Amp:	70.000		

Anexo 6: Tablero de comunicación

