

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD



**DISEÑO DE UN LABORATORIO PARA PRÁCTICA DE SISTEMAS
DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE POTENCIA BASADO EN
DISPOSITIVOS PROGRAMABLES UTILIZADOS EN
SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN PARA LA FCYT DE LA
UNCA**

JUAN PAOLO GONZÁLEZ ROLÓN

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE UN LABORATORIO PARA PRÁCTICA DE SISTEMAS
DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE POTENCIA BASADO EN
DISPOSITIVOS PROGRAMABLES UTILIZADOS EN
SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN PARA LA FCYT DE LA
UNCA**

Elaborado por

JUAN PAOLO GONZÁLEZ ROLÓN

Tutor

ALEX ISMAEL DURE CABAÑAS

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la
Universidad Nacional de Caaguazú, como requisito para la obtención
del título de Ingeniero en Electricidad

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2022

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero en Electricidad aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Acta Nro.: _____

Fecha: _____

Calificación: _____

Dedicado a:

A mi madre que desde el cielo con sus bendiciones me ayudo a salir adelante con mis proyectos.

A mi familia por el apoyo incondicional de siempre.

Agradecimientos:

Mi agradecimiento inicial es a Dios, por la fortaleza para continuar adelante.

De igual manera quiero agradecer a todos lo que hicieron posible este trabajo, a mi tutor, accesoros, familia, compañeros, profesores, amigos.

DISEÑO DE UN LABORATORIO PARA PRÁCTICA DE SISTEMAS DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE POTENCIA BASADO EN DISPOSITIVOS PROGRAMABLES UTILIZADOS EN SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN PARA LA FCYT DE LA UNCA

JUAN PAOLO GONZÁLEZ ROLÓN

RESUMEN

El presente proyecto final de grado consiste en el diseño de un laboratorio para práctica de protecciones en sistemas eléctricos, enfocado a protecciones en subestaciones eléctricas de alta tensión, brindando así al estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica la posibilidad de manipular elementos del sistema de potencia tal como el sistema de protección de una línea de transmisión en un ambiente de laboratorio.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó el análisis de datos recabados de las subestaciones del sistema de transmisión centro de la ANDE, a partir del cual se identificaron los principales elementos del sistema de protección de los circuitos de alta tensión. Posteriormente se estudiaron las normativas que aborda laboratorios de electricidad a ser considerados durante el diseño, a partir del cual se han elaborado los criterios para la selección de los elementos del banco de práctica para el laboratorio y el software de simulación para facilitar la comprensión de conceptos relacionados a protecciones eléctricas en sistemas de potencia. A la luz de los criterios definidos se han seleccionado los elementos del laboratorio de prácticas con un dispositivo de protección de línea a través de un relé programable multifunción con soporte para la norma IEC-61850; un probador de relé relativamente económico pero que reúne las condiciones para el proyecto, un software de simulación con licencia de estudiante para el modelado de los circuitos eléctricos y demás elementos complementarios. Finalmente se ha elaborado un guía de práctica a ser utilizada en el laboratorio y un presupuesto del proyecto.

Palabras claves: Protecciones eléctricas, protocolo IEC-61850, Banco didáctico, relés de protección.

DESIGN OF A LABORATORY FOR THE PRACTICE OF POWER ELECTRICAL PROTECTION SYSTEMS BASED ON PROGRAMMABLE DEVICES USED IN HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS FOR THE UNCA FCYT

JUAN PAOLO GONZÁLEZ ROLÓN

ABSTRACT

This final degree project consists of the design of a laboratory for the practice of protections in electrical systems, focused on protections in high voltage electrical substations, thus providing the student of the Electrical Engineering career with the possibility of manipulating elements of the power system, such as the protection system of a transmission line in a laboratory test environment.

For the development of this project, the analysis of data collected from the substations of the central transmission system of ANDE was carried out, from which the main elements of the high voltage circuit protection system were identified. Subsequently, the regulations that address electricity laboratories to consider during the design were studied, from which the criteria for selection of the elements of the practice bench for the laboratory and the simulation software to facilitate the understanding of concepts were selected related to electrical protections in power systems. In light of the adopted criteria, the elements of the practical laboratory were selected with a line transmission protection device through a multifunction programmable relay with support for the IEC-61850 standard; a relatively inexpensive but eligible relay tester, student-license simulation software for modeling electrical circuits, and other add-ons. Finally, a practice guide of the designed laboratory and a project budget was prepared

.Key Words: Electrical protections, IEC-61850, Didactic bench, protection relays.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS.....	15
I. INTRODUCCIÓN.....	16
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
CAPÍTULO 1	18
1. CONCEPTOS GENERALES.....	18
1.1. ANTECEDENTE HISTORICO	18
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	20
CAPÍTULO 2	21
2. SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.....	21
2.1. SUBESTACIONES CONVENCIONALES	21
2.1.1. Elementos de una subestación eléctrica	21
2.1.2. Principales protecciones en subestaciones	26
2.2. SUBESTACIONES DIGITALES.....	27
2.2.1. Beneficios de las subestaciones digitales.....	27
2.2.2. Nodos Lógicos.....	29
2.2.3. Diagramas según norma IEC 61850	32
CAPÍTULO 3	37
3. AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES IEC 61850	37
3.1. Niveles de control en Subestaciones Eléctricas.....	38
3.1.1. Nivel 0-Proceso-Equipos de campo	38
3.1.2. Nivel 1- IED.-Bahía o Paño.....	39
3.1.3. Nivel 2- Estación.....	40
3.1.4. Nivel 3– Centro de Control	41
3.2. Norma IEC 61850	43
3.2.1. Objetivo	43
3.2.2. Alcance.....	43
3.2.3. Factibilidad	44
3.2.4. Integración y Flexibilidad	44
3.2.5. Gestión, Diseño e Ingeniería	44

3.2.6. Comunicaciones y Optimización.....	44
3.2.7. Evolución histórica.....	45
3.2.8. Organización	46
CAPÍTULO 4	48
4. SISTEMA DE PROTECCIONES	49
4.1. CARACTERÍSTICAS DE UNA PROTECCIÓN	50
4.2. RELEVADORES O RELÉS.....	51
4.3. PROTECCIÓN DE LÍNEAS	51
4.3.1. Protección de distancia (21) (PDIS)	51
4.4. OBJETIVOS DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS:	54
III. RESUMEN EJECUTIVO.....	55
CAPITULO 5	55
5. RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO.....	55
5.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.....	55
5.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS.....	55
5.2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	55
5.2.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS ...	55
5.3. FASES METODOLÓGICAS.....	55
5.4. JUSTIFICACIÓN.....	58
5.5. FINALIDAD DEL PROYECTO	59
5.6. METAS.....	59
5.7. OBJETIVOS.....	59
5.7.1. Objetivo general	59
5.7.2. Objetivos específicos.....	59
5.8. BENEFICIARIOS	60
5.9. PRODUCTO	60
5.10. LOCALIZACIÓN FÍSICA Y COBERTURA ESPACIAL.....	60
5.11. ESPECIFICACIONES DE ACTIVIDADES Y TAREAS REALIZADAS .	62
5.12. FACTIBILIDAD TÉCNICA	62
5.13. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	63
IV. INGENIERÍA DE DISEÑO	64
CAPITULO 6	64
6. DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO	64

6.1. Importancia de laboratorio de prácticas para protecciones de sistemas eléctricos de potencia	64
6.1.1. Necesidad de un laboratorio	64
6.1.2. Sistema de protección de circuitos de potencia en las subestaciones 66	
6.1.3. Condición actual del laboratorio de la institución	68
6.1.4. NORMATIVAS DE SEGURIDAD PARA PRACTICAS ELÉCTRICAS	72
6.1.5. CRITERIOS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL LABORATORIO DIDÁCTICO	73
6.1.6. CRITERIOS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	93
6.1.7. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EN EL LABORATORIO PARA LA PRÁCTICA DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	109
6.1.8. Plan de prácticas para el Laboratorio didáctico	150
6.1.9. Materiales y costos del proyecto de modulo didáctico para la práctica de protecciones eléctricas.....	161
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	163
VI. CONCLUSIONES.....	165
VII. RECOMENDACIONES.....	166
VIII. APÉNDICE	167
7. APÉNDICE A: RESUMEN EJECUTIVO	167
7.1. APÉNDICE A.1:	167
IX. BIBLIOGRAFIA.....	168

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

FIGURA 2.1: TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.....	22
FIGURA 2.2: TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	23
FIGURA 2.3: INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	24
FIGURA 2.4: SECCIONADORES DE POTENCIA	25
FIGURA 2.5: NIVEL 1 Y 2 DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES	27
FIGURA 2.6: NIVEL 1 Y 2 DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES	29
FIGURA 2.7: NOMENCLATURA DE NODOS LÓGICOS SEGÚN IEC 61850-7-4	30
FIGURA 2.8: FIGURA DE EQUIPO FÍSICO Y EQUIPO LÓGICO Y SU RELACIÓN.....	30
FIGURA 2.9: ESTRUCTURA DE OBJETOS BAJO IEC 61850	31
FIGURA 2.10: INDICADORES DE AGRUPACIÓN PARA NODOS LÓGICOS.....	32
FIGURA 2.11: DIAGRAMAS SEGÚN NORMA IEC 61850	33
FIGURA 2.12: ESTRUCTURA DE UNA SUBESTACIÓN SEGÚN NORMA IEC 61850.....	33
FIGURA 2.13: ARCHIVOS SCL	34

CAPITULO 3

FIGURA 3.1: NIVEL 0 DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES.....	39
FIGURA 3.2: NIVEL 1 Y 2 DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES	41
FIGURA 3.3: NIVEL 3 DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES.....	41
FIGURA 3.4: NIVELES DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES [6]	42
FIGURA 3.5: ALCANCE DEL ESTÁNDAR IEC 61850	45
FIGURA 3.6: EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850	46

CAPITULO 4

FIGURA 4.1: SISTEMA DE PROTECCIÓN Y SUS ELEMENTOS	49
FIGURA 4.2: ZONAS DE PROTECCIÓN	53
FIGURA 3.1: LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	61
FIGURA 4.1: SUBESTACIONES DEL SISTEMA CENTRO SEGÚN NIVEL DE TENSIÓN	66
FIGURA 4.2: ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN [4]	67
FIGURA 4.3: MINI BANCADAS DE ENTRENAMIENTO CON PLC - MPS TRAINER.....	69
FIGURA 4.4: BANCADAS DE ENTRENAMIENTO ELECTRO-NEUMÁTICO.....	70
FIGURA 4.5: MÓDULOS PARA CONTROL POR PC	71
FIGURA 4.6: ESTÁNDARES INTERNACIONALES	73
FIGURA 4.7: INTERRUPTOR DE POTENCIA A SER SIMULADO	81
FIGURA 4.8: PARTES PRINCIPALES DEL OMICRON CMC.....	83

FIGURA 4.9: PROBADOR DE RELÉ MEGGER FREJA-546	85
FIGURA 4.10: PROBADOR DE RELÉ SMC QUASAR	86
FIGURA 4.11: PROBADOR DE RELÉ DOBLE F6150E	87
FIGURA 4.12: PROBADOR DE RELÉ PONOVO PW460	88
FIGURA 4.13: PROBADOR DE RELÉ HT-802.....	90
FIGURA 4.14: INTERFAZ GRÁFICA DE POWERFACTORY.....	95
FIGURA 4.15: INTERFAZ GRÁFICA DE PSS/E.....	100
FIGURA 4.16: INTERFAZ GRÁFICA DE ETAP	102
FIGURA 4.17: INTERFAZ GRÁFICA DE POWER WORLD	104
FIGURA 4.18: INTERFAZ GRÁFICA DE MATLAB	106
FIGURA 4.19: INTERFAZ GRÁFICA DE ATP	108
FIGURA 4.20: VISTA FRONTAL DEL DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN REL 670	111
FIGURA 4.21: VISTA TRASERA DE DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN REL 670	111
FIGURA 4.22: UBICACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL IED ABB REL670. FUENTE: MANUAL DE INSTALACIÓN ...	113
FIGURA 4.23: INTERFAZ HMI LOCAL.....	115
FIGURA 4.24: PANTALLA DEL HMI LOCAL.....	116
FIGURA 4.25: TECLADOS DEL HMI LOCAL.....	117
FIGURA 4.26: PUERTO DE COMUNICACIÓN	118
FIGURA 4.27: MÓDULO DE ALIMENTACIÓN.....	120
FIGURA 4.28: CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	120
FIGURA 4.29: MÓDULO TRM.....	121
FIGURA 4.30: MÓDULO BIM.....	122
FIGURA 4.31: MÓDULO BOM	123
FIGURA 4.32: DOCUMENTACIONES DEL RELÉ ABB REL670.....	124
FIGURA 4.33: UBICACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL IED ABB REL670. FUENTE: MANUAL DE INSTALACIÓN ...	125
FIGURA 4.34: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INGENIERÍA DE PROCESO DEL IED	126
FIGURA 4.35: HERRAMIENTAS DEL PCM600	128
FIGURA 4.36: INTERFAZ GRÁFICA DEL SOFTWARE UPDATE MANAGER DE ABB	129
FIGURA 4.37: CREACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PLANTA EN PCM600	129
FIGURA 4.38: INSERCIÓN DEL IED REL670 EN EL PROYECTO.....	130
FIGURA 4.39: INSERCIÓN DE UN IED A PARTIR DE PLANTILLA CON PRECONFIGURACIÓN	130
FIGURA 4.40: PÁGINA DE SELECCIÓN DEL MODO DE CONFIGURACIÓN.....	131
FIGURA 4.41: PÁGINA DE SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	132
FIGURA 4.42: PÁGINA DE CONFIGURACIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	132
FIGURA 4.43: PÁGINA DE SELECCIÓN DE LA VERSIÓN DEL PRODUCTO	133
FIGURA 4.44: SELECCIÓN DEL ARCHIVO DE ORDEN ESPECÍFICO.....	133
FIGURA 4.45: PÁGINA DE SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL IED	134

FIGURA 4.46: IED AGREGADO A LA ESTRUCTURA DE PLANTA DEL PROYECTO	134
FIGURA 4.47: CREACIÓN DE NUEVA HOJA DE APLICACIÓN.....	135
FIGURA 4.48: PÁGINAS DE CONFIGURACIÓN DE APLICACIÓN	135
FIGURA 4.49: PARTES PRINCIPALES DE LOS BLOQUES DE FUNCIONES	136
FIGURA 4.50: LÓGICA DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA PARA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	137
FIGURA 4.51: ENTRADAS ANALÓGICAS DE LOS TC.....	137
FIGURA 4.52: ENTRADAS ANALÓGICAS DE LOS TP	138
FIGURA 4.53: BLOQUE DE FUNCIÓN DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA.....	139
FIGURA 4.54: BLOQUES DE FUNCIÓN DE LA LÓGICA DE DISPARO	140
FIGURA 4.55: SALIDAS BINARIAS	140
FIGURA 4.56: FUNCIONAMIENTO DE UNA PROTECCIÓN DE DISTANCIA DE LÍNEA.....	141
FIGURA 4.57: PARAMETRIZACIÓN DE CANALES DE HARDWARE.....	142
FIGURA 4.58: PARAMETRIZACIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS PARA TC.....	143
FIGURA 4.59: PARAMETRIZACIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS PARA TP.....	143
FIGURA 4.60: PARAMETRIZACIÓN DE PROTECCIÓN DE DISTANCIA DE LÍNEA	144
FIGURA 4.61: PROBADOR DE RELÉ HT-802.....	145
FIGURA 4.62: CONTACTOR ELECTROMECAÍNICO	146
FIGURA 4.63: CONTACTOS AUXILIARES DE CONTACTOR ELECTROMECAÍNICO	146
FIGURA 4.64: IMAGEN ILUSTRATIVA DE UNA FUENTE DE TENSIÓN RECTIFICADA	147
FIGURA 4.65: VISTA FRONTAL DEL TABLERO DE PRÁCTICAS.....	148
FIGURA 4.66: INTERFAZ GRÁFICA DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN SELECCIONADO.....	149

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 4

TABLA 4.1: CANTIDAD DE CIRCUITOS DE CADA SUBESTACIÓN DEL SISTEMA CENTRO.....	75
TABLA 4.2: TABLA DE FUNCIONES DE PROTECCIÓN.....	76
TABLA 4.3: FABRICANTES DE DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN INSTALADOS EN EL SISTEMA CENTRO.....	77
TABLA 4.4: COMPARACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DE DIFERENTES FABRICANTES.....	78
TABLA 4.5: FABRICANTES CON MAYOR GRADO DE CUMPLIMIENTO.....	79
TABLA 4.6: COMPARACIÓN DE EQUIPOS DE PRUEBA DE RELÉ	92
TABLA 4.7: COMPARACIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA.....	109
TABLA 4.8: DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES PRINCIPALES DE LOS BLOQUES DE FUNCIONES [31]	136
TABLA 4.9: LISTA DE MATERIALES Y COSTOS.....	162

LISTA DE ABREVIATURAS

CID	Configured IED Description
ICD	IED Capability Description
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IID	Instantiated IED Description
SCD	Substation Configuration Description
SCL	Substation Configuration Language
SSD	System Specification Description

I. INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ciencias y Tecnología tiene como objetivo formar profesionales en diferentes ramas de la Ingeniería, entre ellas la carrera de Ingeniería en Electricidad cuya misión es la de formar profesionales con los mejores niveles en conocimientos teóricos y prácticos. Dentro de este plan están incluidas las asignaturas de Protecciones de Sistemas Eléctricos 1 y 2, específicamente enfocados a sistemas de potencia en alta tensión, siendo una de las más importantes dentro de la especialidad de cara al futuro profesional.

La evolución de la tecnología ha dado la posibilidad de numerosas mejoras en el campo de la ingeniería, en el área de protecciones en sistemas eléctricos permitió la evolución de los relés electromecánicos a los basados en microprocesadores.

El desarrollo teórico de los contenidos es realizado con normalidad por profesionales especialistas en la materia, no así la aplicación práctica de los conocimientos porque la institución no cuenta con un espacio didáctico para la visualización y práctica con elementos reales del sistema de protección en circuitos de potencia y tampoco cuenta con un sistema de software con la que se puedan realizar simulaciones.

Las subestaciones eléctricas de transmisión son instalaciones complejas que están en funcionamiento constantemente, lo cual no permite su manipulación sin desconectar una parte del sistema de potencia. Esto hace inviable hacer prácticas en sus instalaciones, por lo que contar con un laboratorio en donde pueda realizarse dichas prácticas ayudará a la formación integral del estudiante.

La mayoría de las subestaciones del sistema eléctrico nacional cuenta con equipamiento de última tecnología, con dispositivos inteligentes programables destinados específicamente a realizar las funciones de protección y en algunos casos también las de control y supervisión con sus respectivas normas de implementación y programación. A nivel de software, los dispositivos requieren de la programación con el lenguaje correcto, así como la simulación de ciertas condiciones con la inyección de corrientes y tensión para confirmar su buen

funcionamiento. Conocer estos sistemas es de vital importancia para el buen desenvolvimiento del profesional ingeniero en dicha área.

El desarrollo del presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño de un laboratorio para prácticas en protecciones de sistemas eléctricos enfocado a dispositivo de protección programable instalados en subestaciones eléctricas.

Los apartados que permiten el desarrollo del proyecto se dividen en capítulos; el primero contiene los conceptos generales y el estado del arte de la materia abordada. Seguidamente en el capítulo dos se presentan las subestaciones eléctricas y sus elementos principales, se diferencia también la subestación convencional de la digital.

El capítulo tres abarca la automatización de las subestaciones por estar basada en la norma IEC 61850, la cual define la configuración de los dispositivos de protección programable. El capítulo cuatro presenta el sistema de protecciones, visualizando sus elementos principales, y se hace foco a la protección de líneas de transmisión a través del relé de distancia.

En el capítulo 5 se desarrolla el resumen ejecutivo del proyecto y finalmente en el capítulo 6 la Ingeniería de Diseño en el cual se desarrolla toda la solución al problema planteado.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTE HISTORICO

El trabajo titulado “DISEÑO DE LABORATORIO PARA PRACTICAS EN MEDIA TENSION PARA LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA” presentado en el año 2010 por Antonio Roberto Pérez González a la UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA de Ecuador para obtener el título de Ingeniero Eléctrico tuvo como objetivo principal el diseño de un Laboratorio de Media Tensión para la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

Las conclusiones del trabajo fueron las siguientes: se ha logrado el objetivo con el diseño de un laboratorio de prácticas para media tensión, se han obtenido los parámetros para la implementación según las normas correspondientes, se ha verificado el cumplimiento estricto de los instrumentos utilizados con las normas internacionales. Y por último se ha propuesto un plan de prácticas acorde a la malla curricular.

Otro trabajo interesante es la de Rubén Daniel Álvarez Muñoz presentado a la UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA en el año 2014 para optar al título de grado en Ingeniería Eléctrica. El trabajo se titula “Ampliación de un laboratorio de protecciones eléctricas en líneas de distribución” y tuvo como principal objetivo realizar una serie de mejoras y ampliaciones en el laboratorio de protecciones eléctricas en líneas de distribución situado en la Sala Schneider, primera planta de de la EUETIB. Las conclusiones del trabajo fueron mencionar que aparte de ser un documento donde quedan registradas las mejoras y ampliaciones se pretende que sirva como manual para las siguientes generaciones de alumnos y que les permita realizar ejercicios prácticos de forma cómoda y didáctica al mismo tiempo que se familiarizan con el campo de las protecciones en líneas de distribución y subestaciones de transformación. El autor además menciona que la realización del proyecto ha provocado sobre el alumno un aprendizaje sobre el funcionamiento de

las protecciones, el conexionado y configuración de sus elementos, las telecomunicaciones y protocolos empleados, las diferentes interfaces SCADA utilizadas y muchos más conceptos que hasta el momento el alumno no era consciente de su existencia o siendo consciente no disponía del nivel de conocimiento del que dispone en la actualidad.

1.2. ESTADO DEL ARTE

Contar con un laboratorio de prácticas siempre es beneficioso para una institución académica y si los elementos de dicho laboratorio se encuentran a la vanguardia los estudiantes saldrán al campo laboral con la mejor preparación para afrontar los retos técnicos.

La asignatura de protecciones en sistemas eléctricos abarca los elementos utilizados en instalaciones de alta tensión, los cuales poseen como elementos principales a los relés de protección.

Los relés han evolucionado desde los antiguos relés electromecánicos basados principalmente en campos electromagnéticos, pasando por los relés numéricos digitales hasta llegar a los complejos dispositivos electrónicos inteligentes (IED).

Los IED son dispositivos utilizados en las subestaciones modernas para cumplir funciones de protección, control y monitoreo a través de instrucciones configuradas y estandarizadas por normas internacionales. Aquellas instalaciones que no han actualizado sus dispositivos de protección se exponen a averías graves por no contar con la suficiente rapidez ni el registro de las fallas durante los eventos.

CAPÍTULO 2

SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

2.1. SUBESTACIONES CONVENCIONALES

Una subestación eléctrica es la exteriorización física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución o consumo, con determinados requisitos de calidad. Está conformada por un conjunto de equipos utilizados para controlar el flujo de energía y garantizar la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección.

Una subestación puede estar asociada con una central generadora, controlando directamente el flujo de potencia al sistema, con transformadores de potencia conviniendo la tensión de suministro a niveles más altos o más bajos, o puede conectar diferentes rutas de flujo al mismo nivel de tensión. Algunas veces una subestación desempeña dos o más de estas funciones.

Básicamente una subestación consiste en un número de circuitos de entrada y salida, conectados a un punto común, barraje de la subestación, siendo el interruptor el principal componente de un circuito y complementándose con los transformadores de instrumentación, seccionadores y pararrayos, en lo correspondiente a equipo de alta tensión, y con sistemas secundarios como son los de control, protección, comunicaciones y servicios auxiliares [1].

2.1.1. Elementos de una subestación eléctrica

2.1.1.1. Transformador de instrumentos o de medida

2.1.1.1.1. Transformador de corriente

Son aparatos en que la corriente secundaria, dentro de las condiciones normales de operación, es prácticamente proporcional a la corriente primaria, aunque ligeramente desfasada. Desarrollan dos tipos de función: transformar la corriente y

aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.



Figura 2.1: Transformador de corriente

El primario del transformador se conecta en serie con el circuito por controlar y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los aparatos de medición y de protección que requieran ser energizados.

Un transformador de corriente puede tener uno o varios secundarios, embobinados a su vez sobre uno o varios circuitos magnéticos. Si el aparato tiene varios circuitos magnéticos, se comporta como si fueran varios transformadores diferentes. Un circuito se puede utilizar para mediciones que requieren mayor precisión, y los demás se pueden utilizar para protección. Por otro lado, conviene que las protecciones diferenciales y de distancia se conecten a transformadores independientes [2].

2.1.1.1.2. Transformador de potencial

Son aparatos en que la tensión secundaria, dentro de las condiciones normales de operación, es prácticamente proporcional a la tensión primaria, aunque ligeramente desfasada. Desarrollan dos funciones: transformar la tensión y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.



Figura 2.2: Transformador de potencial

El primario se conecta en paralelo con el circuito por controlar y el secundario se conecta en paralelo con las bobinas de tensión de los diferentes aparatos de medición y de protección que se requiere energizar.

Estos transformadores se fabrican para servicio interior o exterior, y al igual que los de corriente, se fabrican con aislamientos de resinas sintéticas para tensiones bajas o medias, mientras que para altas tensiones se utilizan aislamientos de papel, aceite y porcelana [2].

Hay tres tipos de transformadores de tensión: el de tipo inductivo, el divisor de tensión capacitivo con transformador inductivo y el divisor de tensión capacitivo con amplificador [1].

2.1.1.2. Interruptor

Los interruptores automáticos son dispositivos mecánicos de interrupción capaces de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como de conducir durante un tiempo especificado, interrumpir y establecer corrientes en condiciones anormales, como son las de cortocircuito. Su función básica es conectar o desconectar de un sistema o circuito energizado líneas de transmisión, transformadores, reactores o barrajes [1].



Figura 2.3: Interruptor de potencia

2.1.1.3. Seccionador o cuchillas

Son dispositivos que sirven para conectar y desconectar diversas partes de una instalación eléctrica, para efectuar maniobras de operación o bien para darles mantenimiento.

Las cuchillas pueden abrir circuitos bajo la tensión nominal pero nunca cuando esté fluyendo corriente a través de ellas. Antes de abrir un juego de cuchillas siempre deberá abrirse primero el interruptor correspondiente.

La diferencia entre un juego de cuchillas y un interruptor, considerando que los dos abren o cierran circuitos, es que las cuchillas no pueden abrir un circuito con corriente y el interruptor sí puede abrir cualquier tipo de corriente, desde el valor nominal hasta el valor de cortocircuito. Hay algunos fabricantes de cuchillas que añaden a la cuchilla una pequeña cámara de arqueo de SF6 que le permite abrir solamente los valores nominales de la corriente del circuito [2].

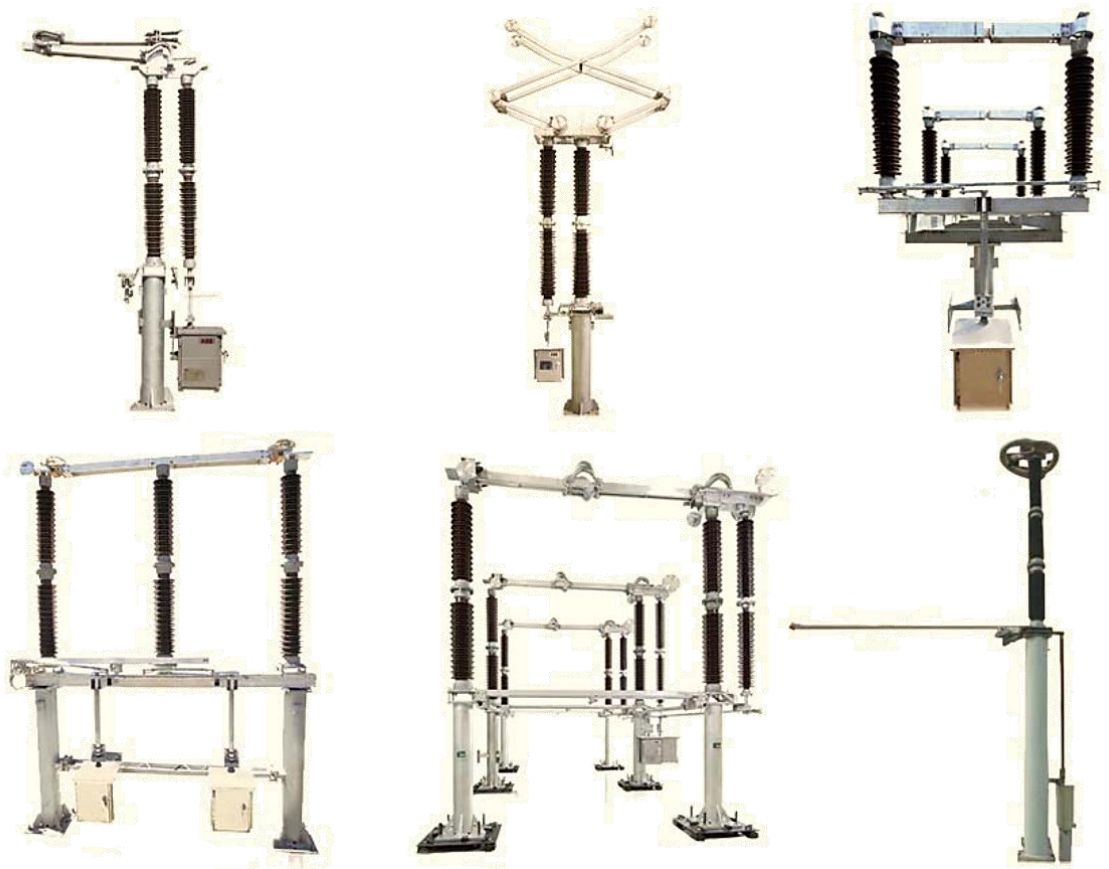


Figura 2.4: Seccionadores de potencia

2.1.1.4. Dispositivos de control

Se entiende por sistema de control de una subestación eléctrica, al conjunto de instalaciones de baja tensión, interconectadas entre sí, que son necesarias para efectuar maniobras en forma manual o automática, en las instalaciones de alta y de baja tensión [2].

2.1.1.5. Dispositivos de protección

Protección de una subestación es un conjunto de sistemas que mantienen vigilancia permanente y cuya función es eliminar o disminuir los daños que puede recibir un equipo eléctrico cuando se presenta una falla. La parte importante de estos sistemas son los relevadores que sirven para detectar la falla y que, a su vez, efectúan la desconexión automática de los interruptores cuando se producen sobrecorrientes debidas a cortocircuitos, aislando las partes del sistema que han fallado [2].

2.1.1.6. Servicios auxiliares

Se entiende por sistemas auxiliares, al conjunto de instalaciones formadas por las fuentes de alimentación de corriente directa y de corriente alterna, de baja tensión, que se utilizan para energizar los sistemas de control, protección, señalización, alarmas y alumbrado de una subestación, así como el sistema contra incendio [2].

2.1.2. Principales protecciones en subestaciones

En una subestación, los principales elementos que necesitan ser protegidos son los siguientes:

1. Líneas o cables de alimentación
2. Bancos de transformadores de potencia
3. Barras colectoras o buses
4. Respaldo local contra falla de interruptores
5. Alimentadores [2]

2.2. SUBESTACIONES DIGITALES

2.2.1. Beneficios de las subestaciones digitales

Hoy en día, las subestaciones con IEC 61850 trabajan con tecnología digital y los sistemas SCADA (Control, Supervisión y Adquisición de Datos) suelen requerir información digital a nivel del bus de estación, pero para contar con una verdadera subestación digital, el estándar se extiende mucho más, abordando la recolección de la información desde la raíz del proceso (Equipo primario) y es cuando hablamos de IEC 61850-9-2 o bus de proceso [3].

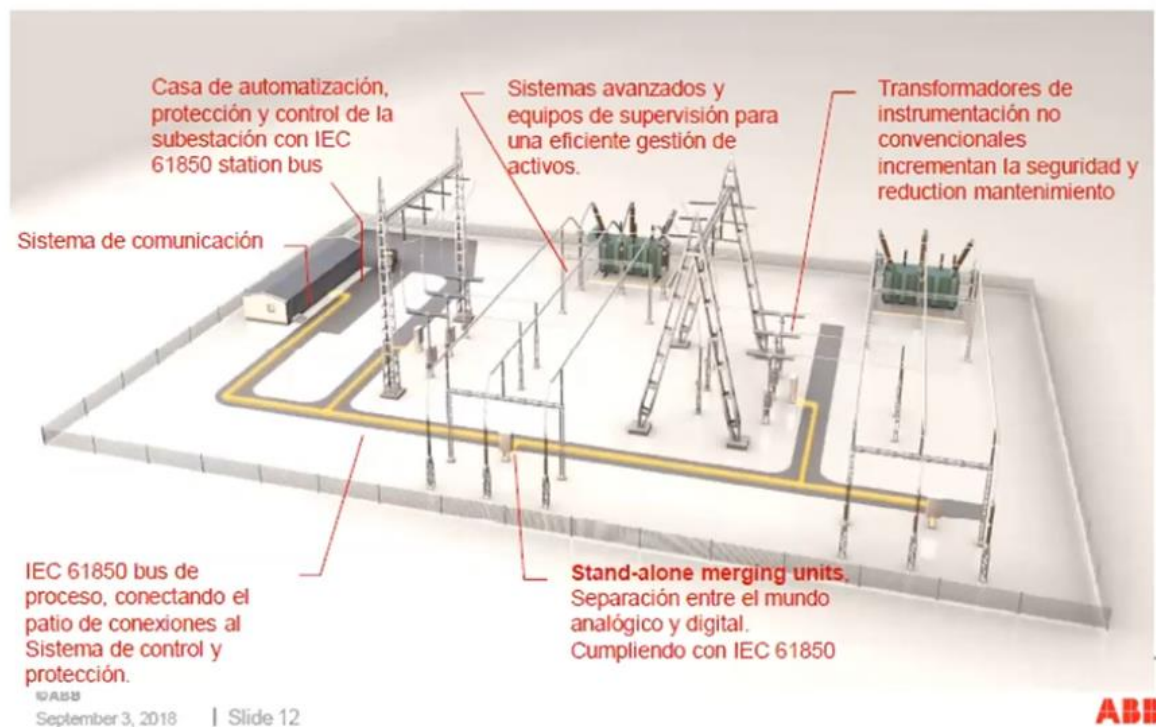


Figura 2.5: Nivel 1 y 2 de automatización de subestaciones

Actualmente las señales de medida obtenidas de los equipos primarios convencionales, como transformadores de corriente o tensión, siguen comunicándose de forma analógica, a través de hilos de cobre, pero no se aprovechan las ventajas que se obtienen al abordar la misma aplicación con señales digitales como:

- Durante la permanente supervisión del sistema, los equipos digitales reducen la necesidad de intervención manual en circuitos eléctricos y aumentan el grado de supervisión.
- Mayor cantidad de información puede ser procesada de manera digital, así como la disponibilidad de dicha información en distintas bahías de la subestación.
- Facilita el análisis de la información al poder tenerla centralizada.
- Adquisición de información sin pérdida de calidad de la misma, lo más cercano a la fuente.
- Integración de transformadores de instrumentación no convencionales (NCIT).
- Equipos NCIT libres de aceite y SF6, como tecnología disponible para su implementación.
- Bajos requerimientos en transformadores de corriente y tensión, debido a la proximidad de los equipos que transforman la señal análoga a digital.
- Reducción de cantidad en cables de cobre y a posibles interferencias electromagnéticas en sus recorridos.
- Aumenta la seguridad del personal de operación al reducir riesgo eléctrico.
- Reducidos tiempos de intervenciones para expansiones, se utilizan sistemas pre-comisionados al poder simular de mejor manera los sistemas en servicio.
- Sistemas e información altamente estandarizados, lo que permite agilizar los trabajos durante y posteriormente en posibles expansiones [3].



Figura 2.6: Nivel 1 y 2 de automatización de subestaciones

2.2.2. Nodos Lógicos

2.2.2.1. Modelamiento de datos

El modelamiento de datos se realiza mediante Nodos Lógicos (con prefijo y sufijo) que residen dentro de cada Equipo Lógico. Los equipos lógicos se clasifican en:

- ANN – Anunciación (alarmas, valores de estados)
- CON – Control (Remote bits o bits de control remoto)
- MET – Medición (corrientes, voltajes, potencia)
- PRO – Protección (funciones de protección y control de interruptores)
- CFG – Configuración (datasets y report control blocks)

2.2.2.1.1. Mapeo de Data por Equipos Lógicos

El mapeo de datos se realiza de manera jerárquica según la norma IEC61850-7-4 como se muestra en las siguientes figuras.

[[Prefijo][Logical Node Class Name]][Número de instancia]]

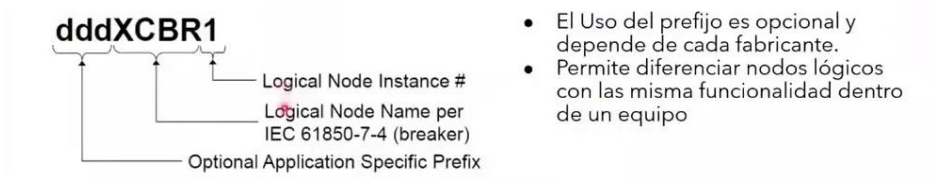


Figura 2.7: Nomenclatura de Nodos Lógicos según IEC 61850-7-4

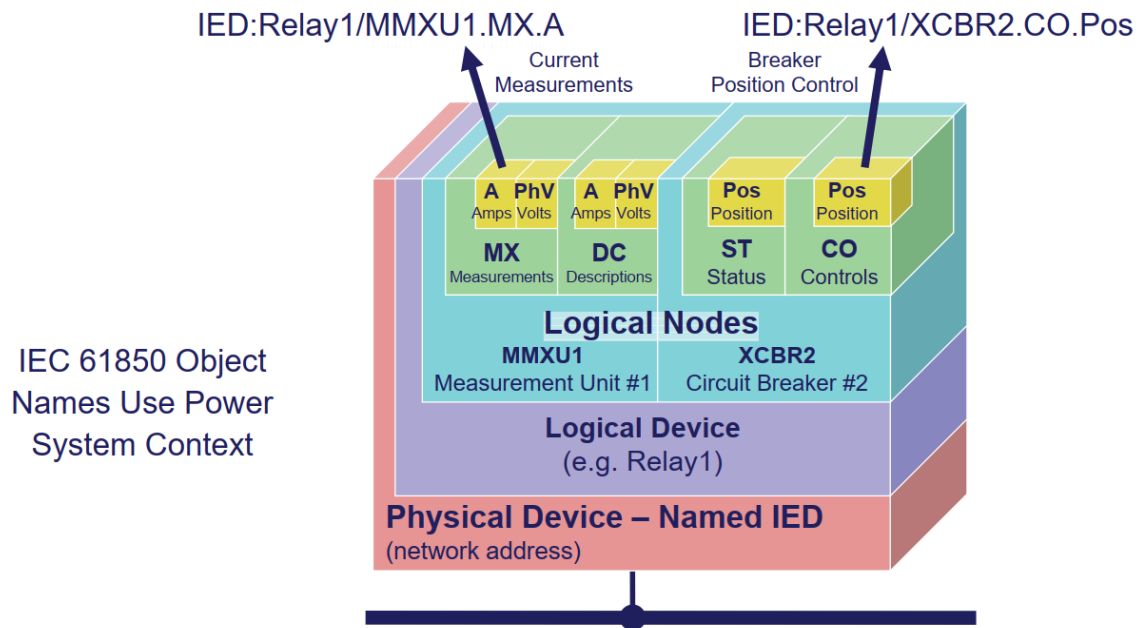


Figura 2.8: Figura de equipo físico y equipo lógico y su relación

Una representación denominada estructura de objetos se observa en la Figura 2.9.

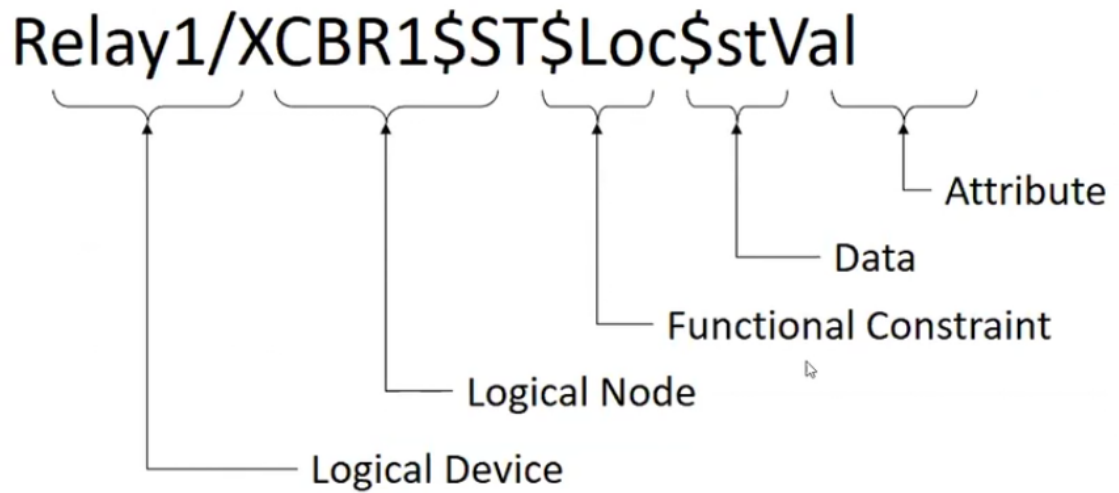


Figura 2.9: Estructura de objetos bajo IEC 61850

2.2.2.1.2. Indicador de agrupación para nodos lógicos

Cada nodo lógico posee una letra que lo identifica como se muestra en la figura siguiente. Como ejemplo se puede observar el indicador X para los interruptores (Switchgear).

Name	Description
Axxx	Automatic Control (4). ATCC (tap changer), AVCO (volt. ctrl.), etc.
Cxxx	Supervisory Control (5). CILO (Interlocking), CSWI (switch ctrl), etc.
Gxxx	Generic Functions (3). GGIO (generic I/O), etc.
Ixxx	Interfacing/Archiving (4). IARC (archive), IHMI (HMI), etc.
Lxxx	System Logical Nodes (2). LLN0 (common), LPHD (Physical Device)
Mxxx	Metering & Measurement (8). MMXU (meas.), MMTR (meter.), etc.
Pxxx	Protection (28). PDIF, PIOC, PDIS, PTOV, PTOH, PTOC, etc.
Rxxx	Protection Related (10). RREC (auto reclosing), RDRE (disturbance)..
Sxxx	Sensors, Monitoring (4). SARC (archs), SPDC (partial discharge), etc.
Txxx	Instrument Transformer (2). TCTR (current), TVTR (voltage)
Xxxx	Switchgear (2). XCBR (breaker), XCSW (switch)
Yxxx	Power Transformer (4). YPTR (transformer), YPSH (shunt), etc.
Zxxx	Other Equipment (15). ZCAP (cap ctrl), ZMOT (motor), etc.
Wxxx	Wind (Set aside for other standards)
Oxxx	Solar (Set aside for other standards)
Hxxx	Hydropower (Set aside for other standards)
Nxxx	Power Plant (Set aside for other standards)
Bxxx	Battery (Set aside for other standards)
Fxxx	Fuel Cells (Set aside for other standards)

Figura 2.10: Indicadores de agrupación para nodos lógicos

2.2.3. Diagramas según norma IEC 61850

La figura muestra el diagrama para una subestación digital según la norma IEC61850. En la figura se puede observar un dispositivo denominado Merger Unit, este dispositivo se encarga de convertir las señales provenientes del campo a señales digitales y las comparte a alta velocidad dentro del bus de proceso con los IED de protección, monitoreo y control.

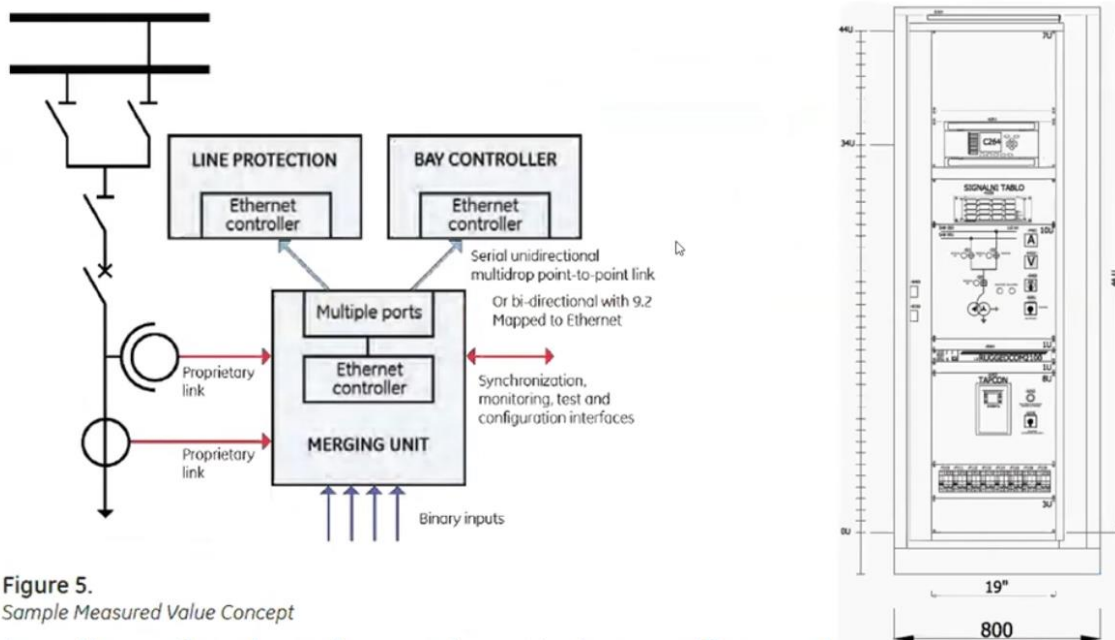


Figure 5.
Sample Measured Value Concept

Figura 2.11: Diagramas según norma IEC 61850

Un resumen de la estructura de una subestación según la norma se muestra en la figura, en el cual se pueden observar los diferentes elementos, niveles y buses que conforman una subestación digital como también el flujo de datos entre ellos.

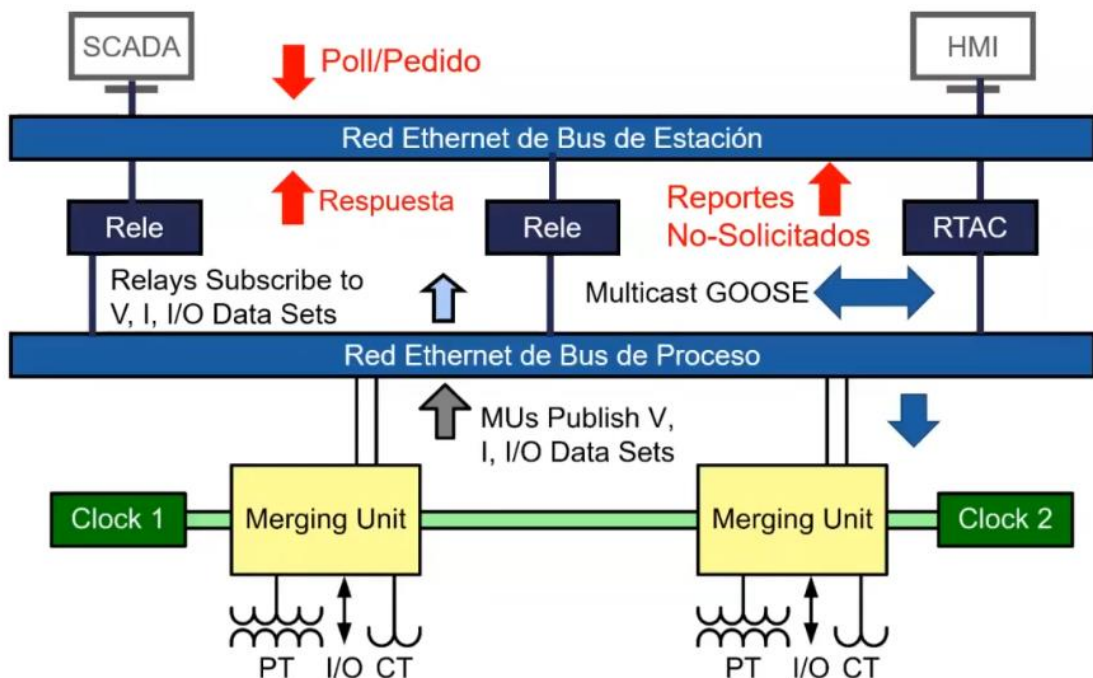


Figura 2.12: Estructura de una subestación según norma IEC 61850

2.2.3.1. Archivos SCL

Substation Configuration Language (SCL) es un lenguaje especificado por la norma IEC61850 para la configuración de subestaciones y dispositivos de subestaciones basado en el lenguaje de marcado extensible (XML) que permite almacenar datos en forma legible. Fue diseñado para facilitar el intercambio de datos entre las diferentes herramientas de ingeniería de diferentes fabricantes. Incluye descripciones de modelos de dispositivos, infraestructura de comunicación y relacionamiento con el sistema de potencia.

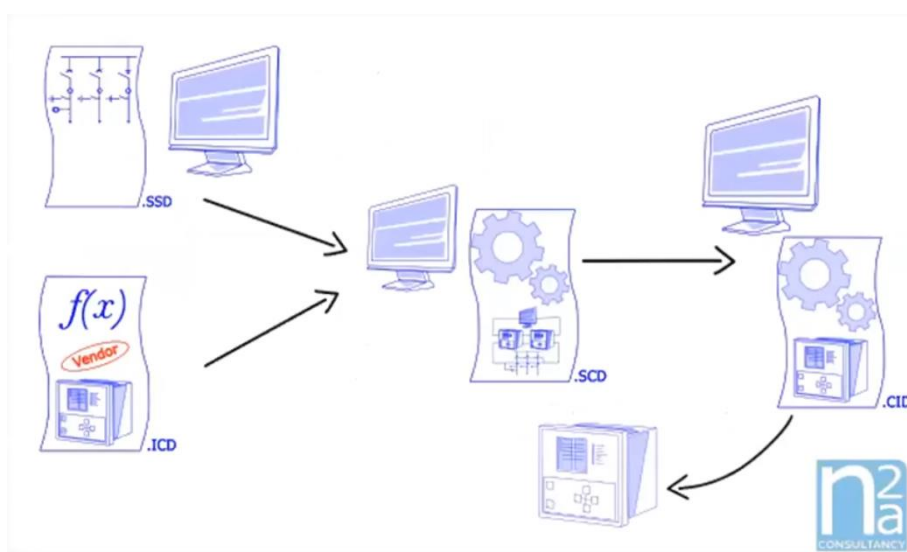


Figura 2.13: Archivos SCL

Dependiendo del propósito, el archivo de configuración SCL puede clasificarse en los siguientes tipos:

- System Specification Description (SSD)
- Substation Configuration Description (SCD)
- Substation Exchange Description (SED) a partir de IEC61850 ed. 2
- IED Capability Description (ICD)
- Configured IED Description (CID)
- Instantiated IED Description (IID) a partir de IEC61850 ed. 2

IED Capability Description (ICD): es el archivo descrito por el fabricante del IED, describe las capacidades del IED, es la configuración por default y no está configurado para una subestación específica.

Configured IED Description (CID): es un ICD modificado o configurado para una aplicación específica. El archivo ICD puede ser editado con software del fabricante o software editores de XML para crear un CID. En este archivo se define la aplicación, forma de comunicación por MMS, GOOSE o SAMPLE VALUES para el intercambio de información dentro de la subestación, todo se define dentro del archivo CID.

Instantiated IED Description (IID): es un archivo similar al CID [4]

2.2.3.2. Secciones de los archivos SCL

Existen cinco secciones por archivo

- Header
- Substation
- Communications
- IED

Un ejemplo de archivo XML de configuración de IED se muestra a continuación.

Ejemplo

```
<!-- Identifica versión y detalles básicos del archivo de
configuración. Ejemplo: RELE.ICD -->
<!-- Primera Seccion - Header -->
<Header id="RELE-01" nameStructure="IEDName">
  <Text>IEC 61850 RELE Relay ICD</Text>
  <History>
    <Hitem version="3" revision="5" when="03/31/2021" who="FACTORY Empleo
yee Owner" why="Disconnect control, RSYN LN and controllable Mod/Beh support
" what="" />
  </History>
</Header>
<!-- Fin de Primera Seccion - Header -->
<!-- Segunda Seccion - SUBSTATION -->
<!-- Fin de Segunda Seccion - SUBSTATION -->
```

```
<!-- Tercera Seccion - Communication -->
<Communication>
  <SubNetwork name="Architect" type="8-MMS">
    <BitRate unit="b/s" multiplier="M">100</BitRate>
    <ConnectedAP idName="RELE_1" apName="S1">
      <Address>
        <P type="OSI-TREL">0001</P>
        <P type="OSI-PREL">00000001</P>
        <P type="OSI-SREL">0001</P>
      </Address>
    </ConnectedAP>
  </SubNetwork>
</Communication>
<!-- Fin de Tercera Seccion - Communication -->
```

CAPÍTULO 3

AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES IEC 61850

Todo proyecto de construcción de una nueva subestación eléctrica, o de renovación de una existente, merece ser exitoso para cumplir la noble misión de ampliar la cantidad de clientes conectados a un sistema de potencia, o para mejorar el servicio prestado por una empresa de distribución de electricidad [5].

Uno de los factores claves para que así sea, lo constituye el manejo a un nivel adecuado de las tecnologías involucradas en la materia de subestaciones por parte de los diferentes actores que intervienen en los proyectos [5].

El mayor reto al respecto lo constituye actualmente el tema del “Sistema de Automatización de la Subestación” SAS, el cual reemplaza a lo que antes se denominaba “sistema de control de la subestación”. La Incurción, hace ya décadas, de las redes de comunicación en el ámbito del sistema secundario de las subestaciones, originó una inesperada brecha tecnológica entre proveedores y usuarios, motivada por una parte por la incorporación de aplicaciones de software elaboradas por ingenieros en computación poco familiarizados con la materia de los sistemas de potencia. Y por otra parte, por el surgimiento de un “lenguaje” al que el personal de las empresas eléctricas no estaba acostumbrado [5].

Los efectos de dicha brecha tecnológica han incluido serias discusiones entre las empresas eléctricas y los contratistas de las obras en relación a costos adicionales, así como demoras innecesarias en la ejecución de los proyectos [5].

Ahora más reciente, fue publicada la norma IEC 61850, con el propósito de solventar el impedimento confrontado inicialmente relativo a la imposibilidad de instalar en un Sistema de Automatización componentes provenientes de diferentes fabricantes (ausencia de interoperabilidad) [5].

Desde su publicación, aún muchos profesionales asumen erróneamente que la norma IEC 61850 tiene por objeto describir un nuevo protocolo de comunicación. Otro segmento de profesionales de la ingeniería eléctrica, al explorar el contenido de la norma, la perciben como “esotérica” e intimidante. Y es que, en efecto, la

norma IEC 61850 es mucho más compleja que las normas típicas dedicadas a otros componentes de las subestaciones. Esas situaciones de hecho han obstaculizado el proceso natural de asimilación de la norma, dando lugar a que en muchos casos se estén implementando como “cajas negras” Sistemas de Automatización basados en la norma, pero con una mínima intervención del personal de las empresas eléctricas propietarias de las subestaciones; Lo cual puede implicar riesgos considerables en la operatividad de los sistemas de potencia, con potencialidad de generar cuantiosas pérdidas económicas y debilitamiento del prestigio de las empresas eléctricas por motivo de interrupciones prolongadas del servicio [5].

3.1. NIVELES DE CONTROL EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Cada una de las funciones de un sistema de automatización, se realiza en los siguientes niveles [6]:

- a. Nivel 0-Proceso-Equipos de campo
- b. Nivel 1- IED -Bahía
- c. Nivel 2-Estación
- d. Nivel 3– Centro de control

El primer nivel (nivel 0), es el nivel de Patio o nivel de Procesos, en el cual se encuentran los equipos de campo, como lo son interruptores y seccionadores.

El segundo nivel (nivel 1), es el nivel de Bahía o IEDs, está conformado por equipos especializados en controlar y proteger la operación de los equipos de campo.

El tercer nivel (nivel 2), es el nivel de Subestación, en el cual desde un sistema SCADA HMI, se realizan las funciones de control, supervisión y adquisición de datos de toda la Subestación.

El cuarto nivel (nivel 3), es el nivel de Centro de Control -

3.1.1. Nivel 0-Proceso-Equipos de campo

En este nivel se encuentran los elementos primarios como interruptores, cuchillas, transformadores de potencia, transformadores de instrumento (de corriente o de

potencial), reactores, capacitores y sus conexiones entre ellos o con el nivel de bahía como relevadores de protección, equipos de medición y de control.

En este nivel sólo se realizan funciones de supervisión y control. Toda la información que se genera se concentra a nivel de bahía.

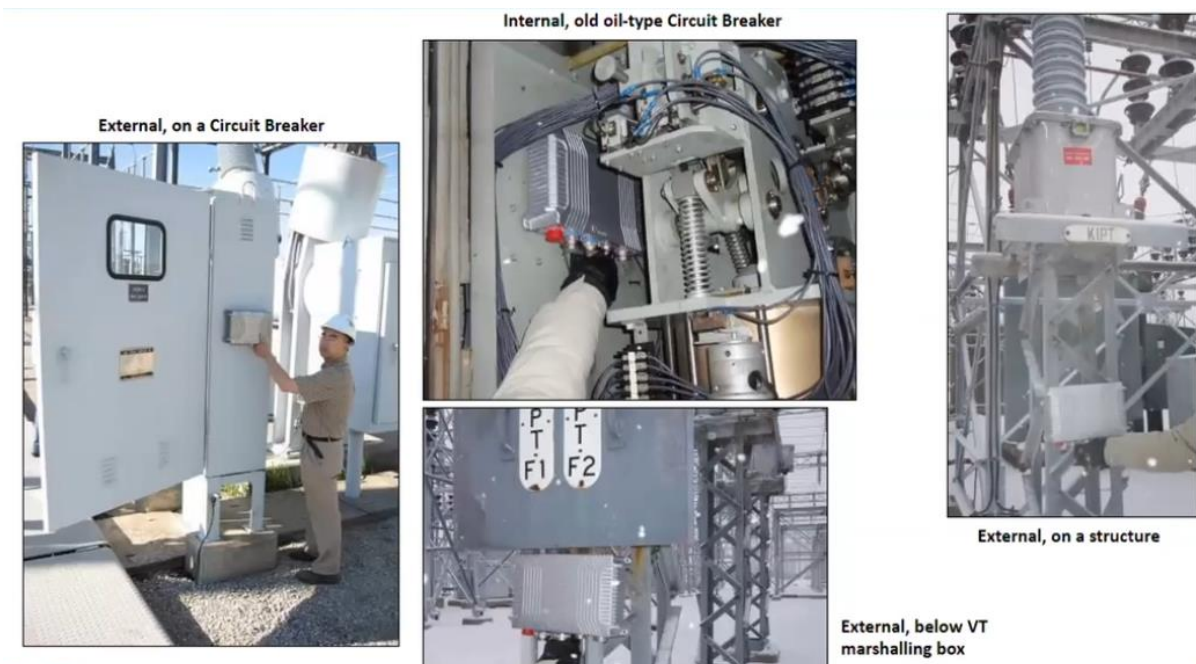


Figura 3.1: Nivel 0 de automatización de subestaciones

3.1.2. Nivel 1- IED.-Bahía o Paño

Este nivel está conformado por los DEI's de nuevas generaciones y es el encargado de conectar elementos del sistema de potencia —líneas de transmisión, transformadores, reactores, entre otros— a las barras de la subestación, y su ámbito de influencia está limitado a los elementos primarios que logran dicha interconexión, como los interruptores y cuchillas, obteniendo la información de las entradas y salidas de los equipos [6].

Asimismo, este nivel puede realizar las funciones de monitoreo y operación de la bahía asociada mediante el uso de IHM (Interfaz Hombre Máquina).

La medición se realiza a través de medidores multifunción o transductores conectados a transformadores de corriente y potencial asociados a la línea de transmisión, transformador u otro elemento del sistema de potencia [6].

La supervisión y control se realiza de distintas formas: desde un elemento expreso dedicado a ello, hasta relevadores de protección que también se encarguen de cada una de las alarmas que se generen en el ámbito de la bahía y equipo primario asociado a ella [6].

En este nivel se concentran todas las alarmas, eventos, estados y mediciones existentes en el equipo primario que forman la bahía [6].

3.1.3. Nivel 2- Estación

En este nivel se encuentran instalados los equipos necesarios que concentran todas las alarmas, eventos, estados y mediciones existentes en todas las bahías para permitir la comunicación con los centros de control remoto y monitoreo [6].

Una función de control y supervisión a nivel estación son los concentradores de datos, como la unidad terminal remota (en sistemas convencionales) o servidores de comunicaciones (en sistemas más modernos), los cuales permiten enlazar la subestación con los centros de control. Asimismo, las mediciones son adquiridas por estos elementos para ser enviados a los centros de control, a falta de un elemento que realice esta función a este nivel [6].

Algunos sistemas cuentan con computadoras que permiten a los operadores controlar, supervisar y tomar lecturas de las mediciones, desde un punto centralizado que se realiza a nivel subestación. A ello se le conoce como Interfaz Hombre - Máquina [6].

Las funciones básicas que se ejecutan a nivel estación, operarán sobre una o más bahías con las que cuente una subestación [6].

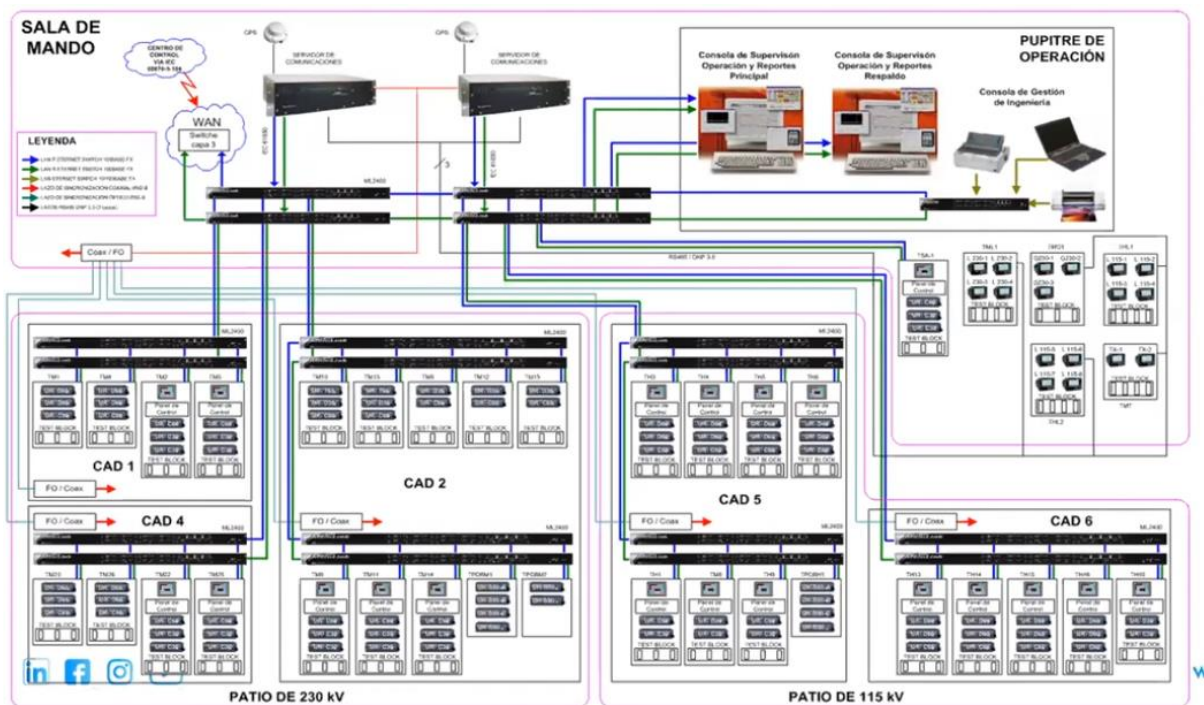


Figura 3.2: Nivel 1 y 2 de automatización de subestaciones

3.1.4. Nivel 3– Centro de Control

El cuarto nivel (nivel 3), es el nivel de Centro de Control - SCADA, en este nivel se concentra la información de los Sistemas SCADA HMI implementados en el tercer nivel, en este nivel es primordial el medio de comunicación establecido entre el Centro de Control SCADA con los Sistemas SCADA HMI de cada Subestación, pues la confiabilidad del sistema será controlada y supervisada desde este nivel [7].



Figura 3.3: Nivel 3 de automatización de subestaciones

Este nivel es el principal y más importante pues, si la integración de todos los niveles inferiores fue desarrollado correctamente, con el desarrollo de este nivel simplemente ya no sería necesaria la utilización de personal supervisor en cada Subestación, bastaría contar con una cuadrilla especial que pueda ser utilizada ante cualquier contingencia, por todo lo demás, desde el Centro de Control SCADA, se puede desarrollar, supervisar, controlar y adquirir la información importante, todo esto de manera directa “on-line” [7].

Hoy en día, entre cada uno de los niveles de automatización, se utilizan selectores de control, que nos sirven para habilitar o deshabilitar el control inmediato de los equipos desde el próximo nivel superior, de esta manera se pueden realizar maniobras de mantenimiento con mayor seguridad [7].

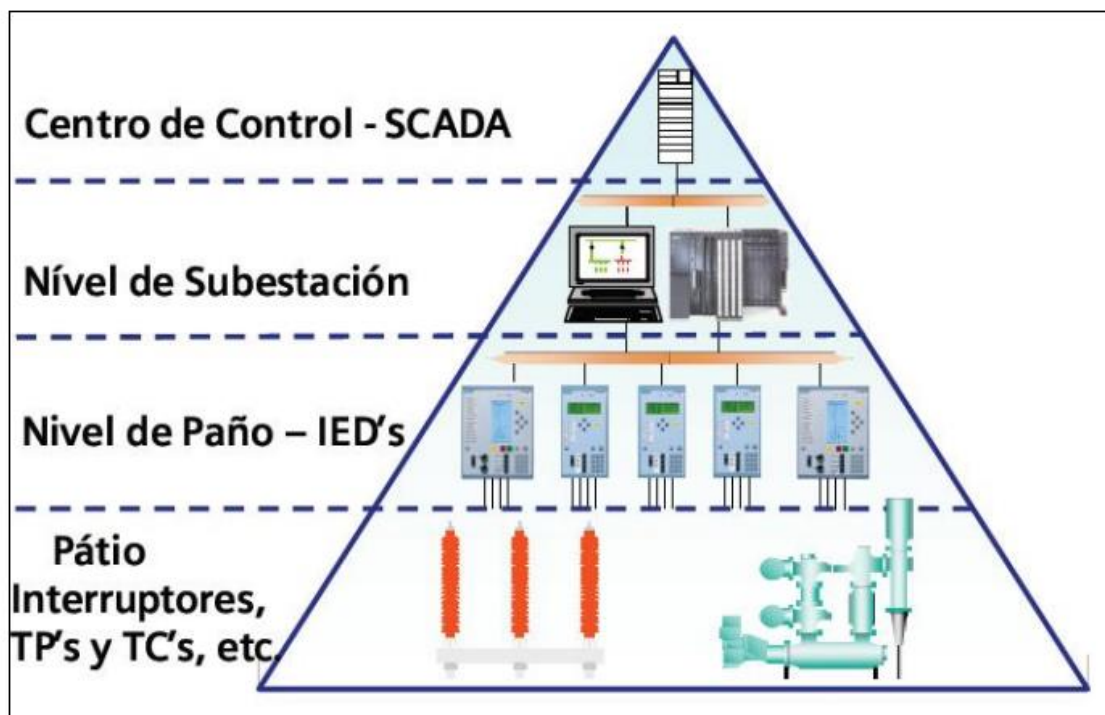


Figura 3.4: Niveles de un sistema de automatización de subestaciones [6]

3.2. NORMA IEC 61850

La norma, teniendo como propósito medular lograr la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes (relés y otros), consiste en una serie de publicaciones en la que se establecen principalmente los siguientes aspectos:

- Una estructura formal y jerárquica para el Sistema de Automatización
- Dos particulares redes de comunicación (red de estación + red del proceso)
- Una serie de parámetros de calidad del sistema (confiabilidad, disponibilidad, otros)
- Un innovativo modelo de datos basado en artificios abstractos (dispositivos lógicos, nodos lógicos, etc.) para implementar las funcionalidades del sistema
- Tres particulares servicios de comunicación (MMS, GOOSE y SV)
- Un método exhaustivo para realizar la Ingeniería del sistema mediante un conjunto de archivos normalizados (lenguaje de configuración SCL) aplicando un grupo de herramientas de Ingeniería [5]

3.2.1. Objetivo

Desarrollar un estándar de comunicaciones que cubra los requerimientos funcionales y de rendimiento, al tiempo que respalda los desarrollos tecnológicos futuros, basado en un consenso entre los fabricantes de IED y los usuarios, sobre el modo en que tales dispositivos pueden intercambiar información libremente (interoperatividad).

3.2.2. Alcance

Soportar las funciones de operación del sistema eléctrico, considerando los requisitos operativos, pero sin estandarizar ni limitar las funciones involucradas en su operación ni su asignación dentro del Sistema de Automatización. Las funciones de la aplicación se identificarán y describirán para definir su interfaz y luego sus requisitos de comunicación, mediante estándares y principios de comunicación e ingeniería aceptados.

3.2.3. Factibilidad

Fuerte desarrollo tecnológico con disponibilidad de microprocesadores avanzados, rápidos y potentes, que brinda la posibilidad de implementar sistemas de automatización, utilizando dispositivos electrónicos inteligentes (IED) en las funciones requeridas de protección, medición, monitoreo y control en tiempo real.

3.2.4. Integración y Flexibilidad

Integra todas las funciones de protección, control, medición y supervisión en una subestación.

Aborda requisitos generales, ingeniería, modelos de datos, soluciones de comunicación y pruebas de conformidad

Establece medios para aplicaciones de protección de subestaciones de alta velocidad, enclavamiento y arrastre.

Impulsa el desarrollo de herramientas para migrar de SAS convencionales a otros sistemas de automatización basados en IEC 61850.

3.2.5. Gestión, Diseño e Ingeniería

Orientado a la automatización de Servicios de Energía.

Cubre el diseño y gestión de las subestaciones.

Lenguaje de Configuración común para intercambio de data entre proyectos

Cubre todos los aspectos comunes en una subestación.

3.2.6. Comunicaciones y Optimización

Estándar internacional para la comunicación en subestaciones.

Define protocolos de comunicación entre los distintos dispositivos de subestaciones eléctricas.

Introduce redes LAN con protocolos asumidos internacionalmente con distintos fines funcionales.

Cambio de soluciones cableadas a redes LAN que multiplica la capacidad de las instalaciones.

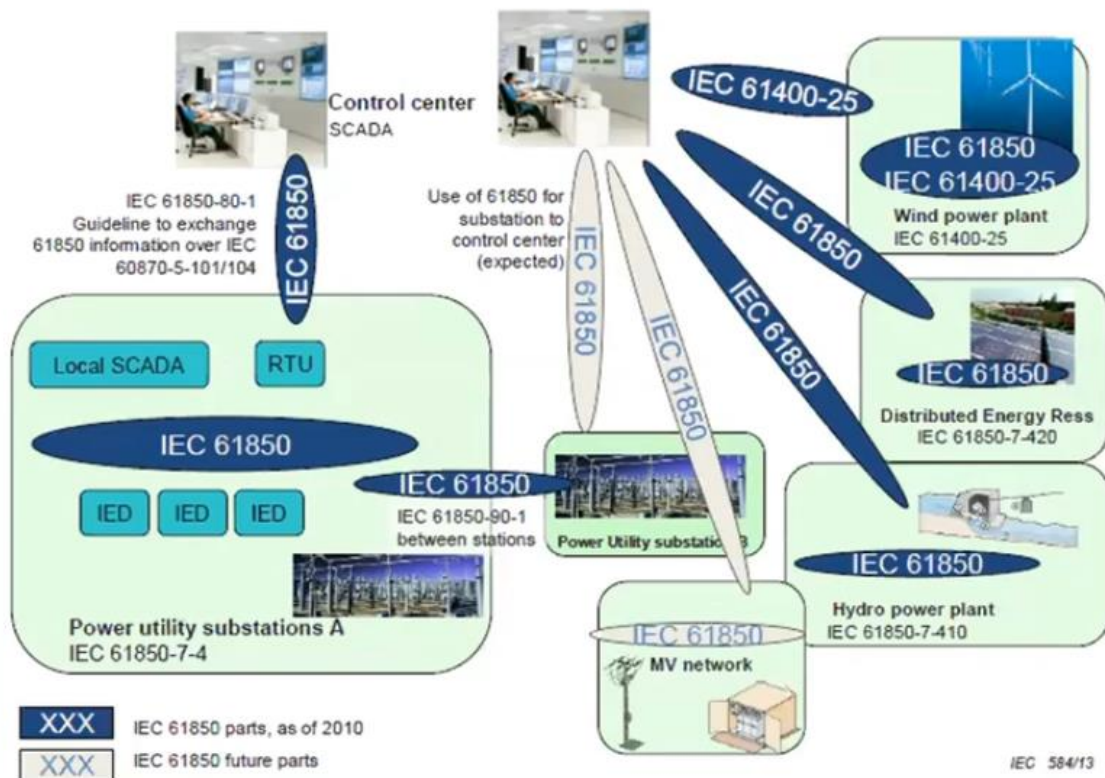


Figura 3.5: Alcance del Estándar IEC 61850

3.2.7. Evolución histórica

- 60-70's: protocolos simples propios de cada fabricante
- 80-90's: primeros protocolos no propietarios (Modbus o DNP)
- 90's:
 - EPRI desarrolla UCA
 - IEC desarrolla IEC 60870-5
- Necesidad de un único estándar internacional: IEC 61850, unión de los trabajos realizados en Europa (IEC) y América del Norte (EPRI).

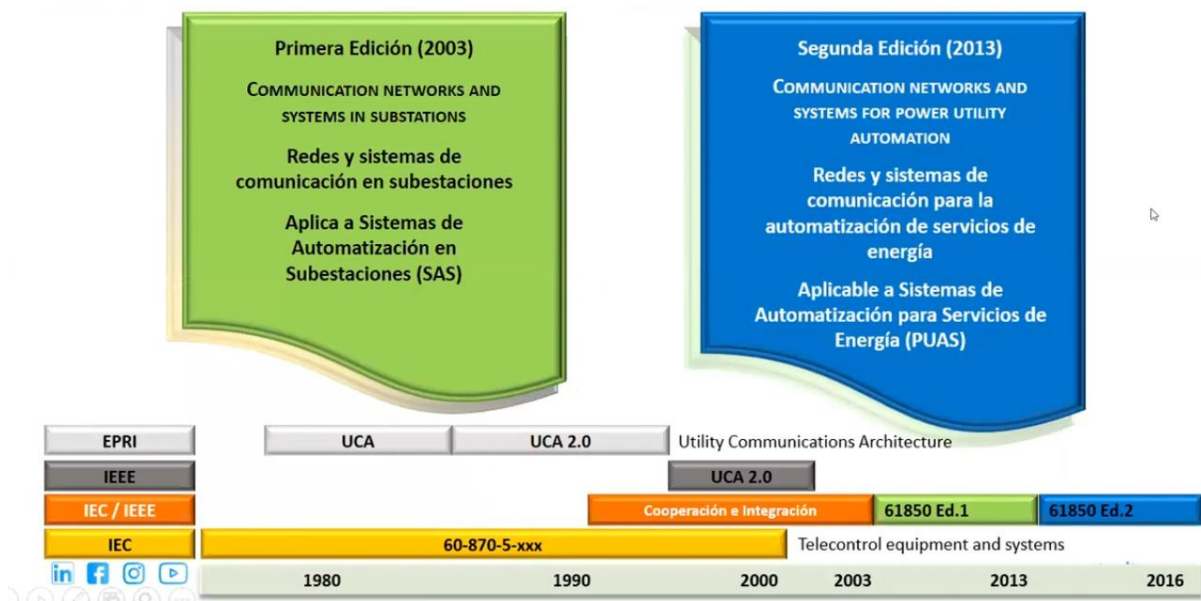


Figura 3.6: Evolución del Estándar IEC 61850

3.2.8. Organización

La norma se divide en partes. Cada una describe un aspecto de la solución completa:

- Parte 1, describe de forma general los alcances y filosofía de la norma.
- Parte 2, recopila las definiciones y acrónimos que se emplean en todas las partes que componen la norma.
- Parte 3, establece cuáles son los requerimientos de robustez y desempeño que deben cumplir los componentes especificados en la norma. No obstante que es un buen parámetro a seguir, el cumplimiento de esta parte de la norma no garantiza el buen funcionamiento de un sistema.
- Parte 4, establece los conceptos relacionados a la administración de un proyecto para un Sistema de Automatización de Subestaciones (SAS) basado en la norma. Incluye lo referente a los compromisos del fabricante en cuanto a soporte y disponibilidad de partes de repuesto.
- Parte 5, establece la forma en cómo se deben interpretar y organizar tanto las funciones como la información en los dispositivos. Incluye el modelo para conceptualizar el intercambio de datos entre las distintas funciones del sistema.

- Parte 6, describe un Lenguaje de Configuración de Subestación. Su objetivo es establecer un formato normalizado para el intercambio de configuraciones de cada componente del sistema, con el fin de lograr la interoperabilidad. Emplea tecnologías bien conocidas y abiertas como Extensible Markup Language (XML)³ y sus plantillas en XML Schema Definition (XSD)⁴ de la World Wide Web Consortium (W3C).
- Parte 7-1, describe de forma detallada, pero abstracta, la forma de modelar los principios de las comunicaciones y los modelos de información que se describen en las partes 7-2, 7-3 y 7-4. También detalla cómo se deben implementar los servicios de las comunicaciones, empleando protocolos concretos.
- Parte 7-2, establece los servicios abstractos que todo dispositivo debe contar, dependiendo de su función en un SAS. Estos servicios se declaran abstractos, porque no se define qué medio se debe emplear, esto es, dice el "qué", pero no define el "cómo".
- Parte 7-3, establece los tipos de datos comunes que son empleados en la parte 7-4.
- Parte 7-4, especifica cómo se debe organizar la información y funciones relacionadas con las aplicaciones existentes dentro de las subestaciones. Se emplean los conceptos de dispositivos lógicos como elementos contenedores, mientras que se adopta el Nodo Lógico, como elemento para definir una función muy concreta del Sistema. Estos modelos son muy genéricos y demasiado abiertos, dando lugar a una gran anarquía entre los fabricantes sobre cómo organizan la información, dificultando la intercambiabilidad de un equipo por otro.
- Parte 8, define los métodos estándar en los que se deben implementar los servicios abstractos de las comunicaciones, empleando protocolos de comunicación y medios físicos que transmitan la información. En la parte 8-1 se emplea Ethernet (ISO/IEC 8802-3) como medio y MMS (Manufacturing Message Specification), ISO 9506-1 e ISO 9506-2 como protocolo de transporte, ambos bien establecidos en la industria y sujetos a estándares internacionales. Esta implementación se emplea para la adquisición de datos

y para el intercambio de información en tiempo real entre dispositivos, a los que se les denomina comunicación vertical y horizontal, respectivamente.

- Parte 9, describe la forma de implementar los servicios abstractos, pero sólo para aquellos relacionados con el intercambio de información entre equipos de medición primaria, como son transformadores de corriente (indistintamente en adelante TC o TC's) y transformadores de potencial (indistintamente en adelante TP o TP's). Este intercambio emplea valores muestreados (Sample Valúes), transmitidos en tiempo real (en el orden de microsegundos) que guardan un fuerte compromiso con su alineación en el tiempo, con el fin de que el dispositivo de medición o de protección secundario, como medidores y relevadores de protección, sea capaz de reproducir las señales de los TC's y TP's entregadas de forma directa, es decir, de forma tradicional.
- Parte 9-1, define el mapeo de servicios abstractos para la transferencia de valores muestreados punto a punto de acuerdo a la norma IEC 60044-8.
- Parte 9-2 emplea Ethernet (ISO/IEC 8802-3) como medio para la transmisión de los valores muestreados. Para esta parte, surge una variación denominada "LE" (por sus siglas Light Edition) la cual ha logrado atraer a más fabricantes y cuenta con buenas experiencias en laboratorios de todo el mundo, Incluyendo México (Stephen Meier, 2011).
- Parte 10, establece las pruebas de conformidad y la metodología para verificar si un dispositivo será capaz de comunicarse en un SAS basado en la norma. Hasta la edición 1.0, sólo se incluían pruebas para los servidores, es decir, los proveedores de información, los clientes, quienes la emplean, no están considerados. Debido a la gran influencia de los fabricantes durante la elaboración de la Edición 1.0, no existe garantía de interoperabilidad, aun cuando se cuente con los certificados de cumplimiento, por lo cual, las empresas eléctricas han desarrollado algunos procedimientos para verificar el funcionamiento e interoperabilidad de los componentes que forman los Sistemas de Automatización en Subestaciones (SAS) [6].

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE PROTECCIONES

Un sistema de protección es el conjunto de dispositivos y elementos interrelacionados (y sus funciones) que permiten o aportan al objetivo del mismo: proteger el equipo de potencia que corresponde o al sistema de potencia [8].

Los equipos de protección se utilizan en los sistemas eléctricos de potencia para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en un efecto cadena. Los sistemas de protección deben aislar la parte donde se ha producido la falla buscando perturbar lo menos posible la red, limitar el daño al equipo fallado, minimizar la posibilidad de un incendio, minimizar el peligro para las personas, minimizar el riesgo de daños de equipos eléctricos adyacentes [8].

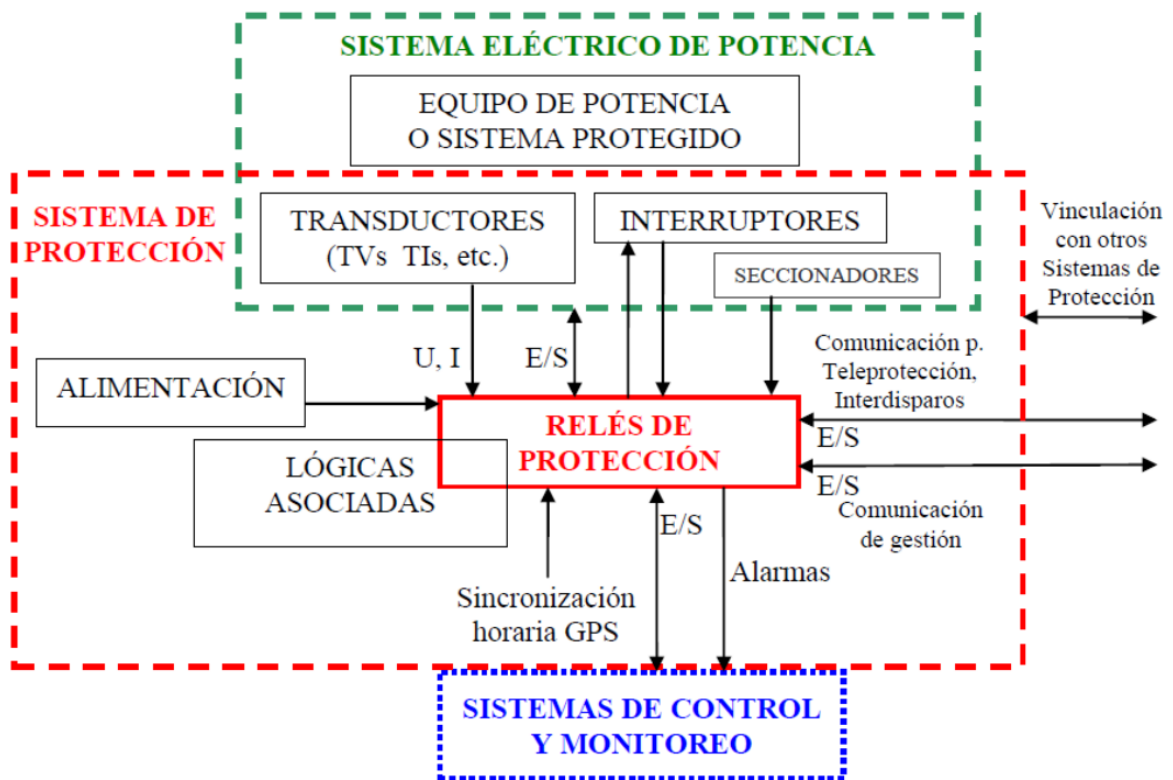


Figura 4.1: Sistema de protección y sus elementos

Los sistemas de protección se basan en diferentes diagramas esquemáticos, con un conjunto de relevadores que protegen un conjunto de zonas. Cada zona debe

estar protegida por dos juegos de protecciones que deben ser lo más independiente posible, con objeto de cubrir la falla de alguno de los dos juegos.

Estas protecciones se denominan:

- Protección primaria
- Protección secundaria o de respaldo
- Protección de respaldo remoto
- Protección de respaldo local de interruptor

4.1. CARACTERÍSTICAS DE UNA PROTECCIÓN

Dependiendo de la importancia de una subestación, las protecciones deben seleccionarse de acuerdo con las siguientes características:

Sensibilidad. Según esta característica, un relevador debe detectar y operar con señales pequeñas.

Selectividad. Cuando en un sistema se presenta una falla, debe operar la protección más cercana a la falla, sin cortar la energía que alimenta otras áreas del sistema, seleccionando los interruptores necesarios que libran la falla.

Velocidad. La característica de velocidad es fundamental para disminuir al máximo los daños en la zona de falla y además para evitar que el sistema salga de sincronismo. La velocidad depende de la magnitud de la falla y de la coordinación con otras protecciones.

Confiabilidad. La confiabilidad junto con la velocidad son muy importantes, pues un relevador puede ser muy rápido y en un momento crítico puede fallar, por lo cual de nada serviría. Por esto, los relevadores deben adquirirse de un fabricante de prestigio, tener buen mantenimiento, estar bien ajustados y en general ofrecer la seguridad de que no van a fallar cuando más se necesite su operación.

Precio. El precio de una protección es un factor relativamente poco importante, si se compara con el costo del resto del equipo de la instalación, por lo que debe tratarse de adquirir la mejor calidad posible [2].

4.2. RELEVADORES O RELÉS

Son dispositivos electromagnéticos o electrónicos que protegen los equipos de una instalación eléctrica de los efectos destructivos de una falla, y reducen sus efectos y daños. Al decir “que protegen” se hace referencia a que al actuar en combinación con otros equipos, se encargan de reducir el daño, debido a la rápida desconexión del equipo que ha fallado.

Los relevadores son dispositivos que envían a los interruptores considerados una señal de apertura, y se dice que funcionan cuando al energizarse su bobina de disparo cierran sus contactos, disparando los interruptores [2].

4.3. PROTECCIÓN DE LÍNEAS

Los sistemas de protección de líneas pueden ser de diferentes tipos. Los más comunes son protección de distancia, comparación de fases, protección diferencial longitudinal y protección por comparación direccional.

La protección de distancia es del tipo protección relativamente selectiva y las otras tres son protecciones absolutamente selectivas que requieren, para ejecutar una función principal, un sistema de telecomunicaciones entre los terminales de la línea. A continuación, se describen brevemente estos tipos de protección [1].

4.3.1. Protección de distancia (21) (PDIS)

Se basan en la comparación de la corriente de falla, vista por el relevador, contra la tensión proporcionada por un transformador de potencial, con lo cual se hace posible medir la impedancia de la línea al punto de falla. El elemento de medición del relevador es de alta velocidad (instantáneo) o con un retardo que suministra un elemento de tiempo. Normalmente, la impedancia es la medida eléctrica de la distancia, a lo largo de una línea de transmisión, desde la subestación hasta el lugar donde ocurre la falla.

La característica direccional de un relevador de distancia puede ser propia, o se le incluye, acoplándole un relevador direccional. Estos relevadores tienen gran aplicación en protección de líneas, en donde se requiere la operación selectiva de

interruptores en cascada, y también, en los casos en que las corrientes de carga puedan ser mayores que las de cortocircuito.

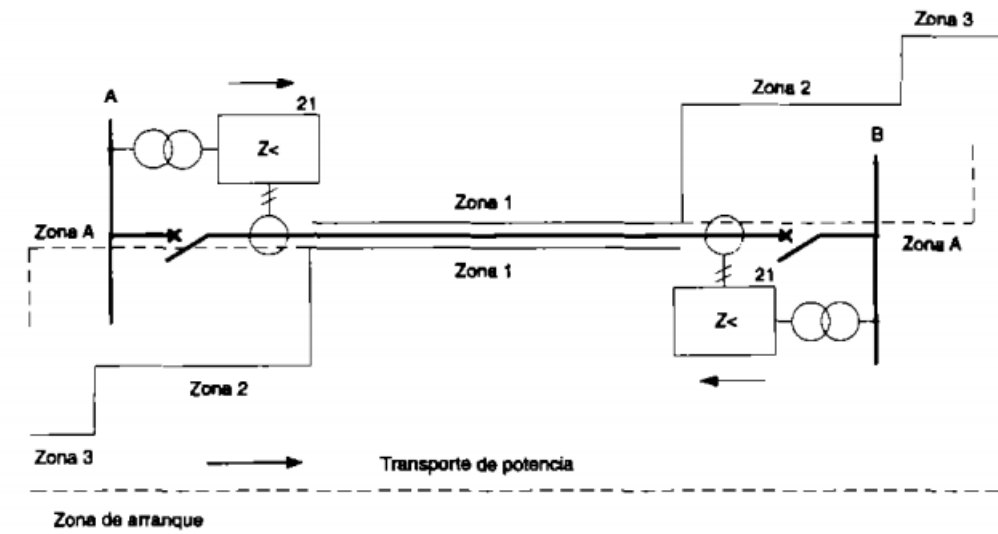
Los relevadores de distancia más utilizadas son los siguientes:

Tipo impedancia. Se utilizan para proteger las fallas entre fases, en líneas de longitud media. Por sí solo no es direccional. Necesita incluir un relevador direccional para medir la impedancia en una sola dirección.

Tipo admitancia (Mho). Es una combinación de relevador de impedancia y direccional, se utiliza para proteger fallas entre fases o pérdidas de excitación en generadores o en grandes motores síncronos [2].

Normalmente la protección de distancia mide la impedancia de carga de la línea, la cual puede ser expresada como $\frac{U_L}{I_L} = Z_L$, es decir, la relación entre la tensión y la corriente vistas por el relé en su sitio de instalación. Si hay una falla, la medida de la impedancia será menor que la impedancia de carga y la protección operará [1].

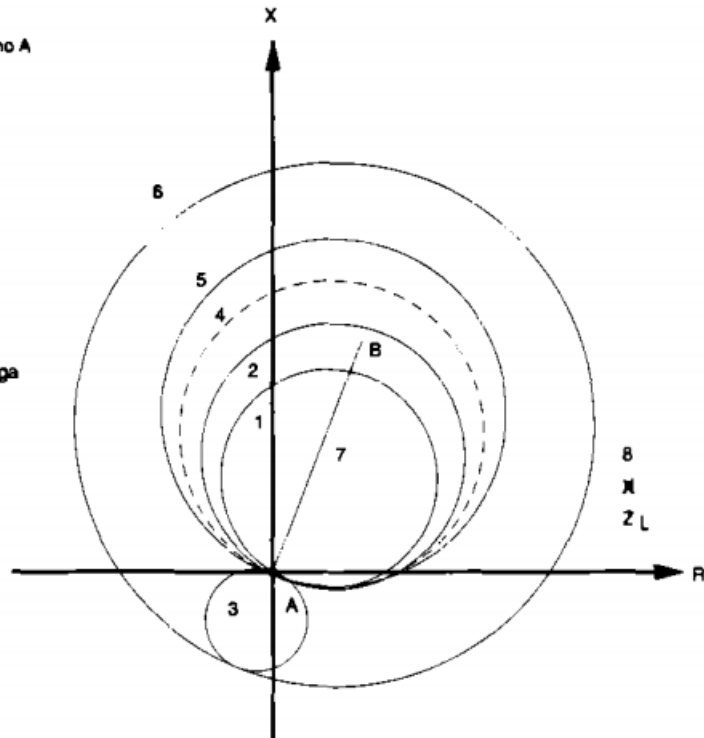
Es común estudiar el alcance de la protección de distancia en un plano R-X. En este diagrama, la protección de la línea, la característica de operación de la protección y la impedancia de carga pueden ser ilustradas. Un diagrama R-X típico para una protección de distancia se ilustra en Figura 4.2.



Nota : la zona 3 también cubre la zona 2 y la zona 1
la zona 2 también cubre la zona 1

Protección en el extremo A

1. Zona 1
2. Zona 2
3. Zona reversa
4. Zona A (zona acelerada)
5. Zona 3
6. Zona de arranque
7. Línea protegida (A - B)
8. $Z_L = U_L / I_L =$ impedancia de carga



La protección de distancia operará si la impedancia medida está dentro de los círculos

Figura 4.2: Zonas de protección

La protección de distancia es una protección relativamente selectiva, lo cual significa que la selectividad se alcanza sin una comparación del extremo remoto y así. no requiere ningún sistema de telecomunicación para su función básica. Es por ello que el ajuste de impedancia y tiempo son muy importantes. Una protección de

distancia tiene varias zonas, mínimo tres y comúnmente cinco. La primera zona es instantánea y las otras son retardadas o temporizadas Figura 4.2 [1].

4.4. OBJETIVOS DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS:

- Detectar las perturbaciones de origen eléctrico.
- Preservar en gran medida la continuidad del servicio eléctrico.
- Mitigar o disminuir las perturbaciones sobre el sistema eléctrico.
- Aislar el equipamiento, nodo o área del sistema eléctrico fallado.
- Limitar los riesgos debido a daños sobre el equipamiento del sistema.
- Mitigar los riesgos de explosión o incendio, en las instalaciones eléctricas.
- Garantizar la adecuada operatividad del sistema eléctrico frente a perturbaciones.
- Evitar sustancialmente el riesgo de daño o pérdida de la vida del personal que coexiste con el sistema.

III. RESUMEN EJECUTIVO

CAPITULO 5

RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El presente proyecto final de grado consiste en el diseño de un laboratorio para practica de protección en sistemas eléctricos enfocado específicamente a sistema de potencia en alta tensión, para la FCyT de la UNCA.

5.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS UTILIZADAS

5.2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Al referirse al tipo de investigación adoptado para el desarrollo puede mencionarse que según el propósito o finalidad corresponde a una investigación aplicada o práctica que se define como aquella que es concreta y busca la aplicación de los conocimientos en resolver algún problema determinado [11]. Mientras que teniendo en cuenta el origen de la información, se encuadra en una investigación de campo.

5.2.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica utilizada en el trabajo corresponde por un lado a documental al recopilar información a partir de documentos tales como manuales, registros históricos revistas científicas, etc. La técnica mencionada se complementó con entrevistas a diferentes involucrados en el proyecto, aplicando como instrumento de recolección de datos el cuestionario.

Como resultado de los datos recopilados se ha evidenciado la necesidad de un laboratorio de práctica para protecciones eléctricas, así como los datos técnicos asociados para el buen diseño del laboratorio de práctica de Sistemas de Protecciones.

5.3. FASES METODOLÓGICAS

El trabajo se desarrolló en las siguientes fases metodológicas:

- **Fase I:** Revisión bibliográfica sobre elementos de protección en subestaciones eléctricas de alta tensión.

La primera fase consistió en la identificación y el estudio de los elementos más importantes del sistema de protección instalados para circuitos de potencia instalados en una subestación eléctrica de alta tensión. Clasificándolos según importancia, funcionalidad, aplicaciones y demás características relevantes. Se realizó un listado de los mismos para su posterior consideración a la hora de seleccionar los elementos para el laboratorio.

- **Fase II:** Revisión de normativas sobre el diseño de laboratorios de electricidad

Esta fase abarcó la revisión de las normativas que rigen el diseño de laboratorios para la realización de prácticas eléctricas. Se describieron las normativas relacionadas a prácticas de laboratorio en electricidad tales como la manipulación de equipos eléctricos, normas de seguridad, normas para la creación de espacios de aprendizaje y para la creación de laboratorios de electricidad.

Se tuvieron en cuenta además las normas que rigen para las configuraciones de equipos utilizados en los laboratorios de electricidad y las normas para la conexión de relés de protección. Se describirán los puntos resaltantes sobre las nomenclaturas de colores, simbología, diagramas, tensiones y corrientes que manejan los relés de protección. Del mismo modo se estudiaron las normativas que rigen para la definición e incorporación de cada elemento del sistema de protecciones.

- **Fase III:** Definición de criterios y selección de los elementos de laboratorio

Se definieron criterios e inmediatamente se seleccionaron cada uno de los elementos a ser instalado en el laboratorio para la práctica de protecciones eléctricas en alta tensión. Entre aspectos que fueron considerados a la hora de definir los criterios se enfatizaron la aplicabilidad en el laboratorio, cantidad de equipos similares instalados en las subestaciones, así como el elemento a

proteger, costos, disponibilidad de información en la web de forma gratuita y libre, representantes en el país, interfaces de hardware y software. La selección se realizó posterior a un estudio de los criterios definidos.

- **Fase IV:** Definición de criterios y selección de alternativas de simulación por software

Como siguiente fase, se definieron criterios para la selección de un software de simulación, considerando características como la posibilidad de aplicación diferentes tipos de fallas comunes en circuitos de potencia en alta tensión, Interfaz amigable, licencia libre, plataformas compatibles, lenguajes, compatibilidad de archivos, normativas, etc.

- **Fase V:** Disposición de los elementos en el laboratorio para la práctica de protecciones eléctricas en AT y descripción de pasos para la programación del elemento de protección

Ubicación de los elementos previamente seleccionados en el recinto del laboratorio de la FCyT de la UNCA, se definieron los detalles correspondientes a la interconexión de cada uno de los elementos y su montaje en un módulo didáctico que facilite su manipulación o acceso por parte de los estudiantes de la carrera de ingeniería.

- **Fase VI:** Elaboración del plan de prácticas para el laboratorio

Finalmente se elaboró un plan de prácticas con las diferentes actividades que son posibles implementar en el laboratorio de prácticas, definiendo los objetivos, procedimientos, pasos, cuidados, etc.

- **Fase VII:** Elaboración del presupuesto del proyecto de laboratorio de práctica de Protecciones Eléctricas

Como se trata de un proyecto netamente con fines educativos, con un beneficio directo para el estudiante de esta casa de estudios, su valor radica en su utilidad didáctica. Por lo mencionado, el proyecto se concluye con un presupuesto detallado con los costos que involucraría la implementación del proyecto.

5.4. JUSTIFICACIÓN

En el área de ingeniería un laboratorio bien diseñado es una valiosa herramienta que contribuye a reforzar la enseñanza y en el que los alumnos pueden lograr una mayor comprensión de lo aprendido. En este lugar, los estudiantes pueden verificar el modelo, validar y limitar suposiciones y predecir resultados. Es importante destacar que se ha demostrado que los estudiantes parecen estar más motivados cuando tienen la oportunidad de hacer experimentos con situaciones reales [12].

Se puede recalcar que el trabajo es esencial porque beneficia directamente a los estudiantes que están cursando los últimos años de la carrera sin dejar de lado a los estudiantes de grados inferiores que también podrán aprender con antelación en algunas materias relacionadas a Sistemas Eléctrico de Potencia.

Un estudiante que tuvo una preparación teórica y práctica durante el desarrollo de la carrera, es capaz de desenvolverse sin dificultad en el campo laboral dejando en alto a la Facultad y por ende a la Universidad donde realizó su formación profesional. Esto es lo que se busca con la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad del Caaguazú, mediante la realización de este proyecto de fin de grado se podrá cumplir con este objetivo, en lo que hace a la materia Protección de Sistemas Eléctricos.

Además de los estudiantes que son los principales beneficiarios junto con la institución formadora, existen numerosas empresas que se dedican al rubro técnico en áreas de protecciones eléctricas en subestaciones eléctricas, con la bancada didáctica es posible realizar cursos específicos de formación para ellos, generando de esta forma un pequeño ingreso que pueda compensar en parte la inversión.

5.5. FINALIDAD DEL PROYECTO

El trabajo final de grado tiene como finalidad diseñar un laboratorio para práctica de protecciones en sistemas eléctricos, enfocado a las protecciones utilizadas en subestaciones eléctricas de alta tensión para la protección de circuitos de potencia como una línea de transmisión. Como resultado se tiene el diseño de una bancada con una representación más cercana a los elementos existentes en las subestaciones, para brindar la posibilidad a los estudiantes de manipular diferentes elementos que en otras circunstancias sería imposible.

5.6. METAS

Proponer al menos el diseño de un laboratorio orientado a la práctica de protecciones de sistemas eléctricos.

5.7. OBJETIVOS

5.7.1. Objetivo general

Diseñar un laboratorio para práctica de sistemas de protecciones eléctricas de potencia basado en dispositivos programables utilizados en subestaciones de alta tensión para la FCyT de la UNCA.

5.7.2. Objetivos específicos

- Estudiar elementos protección más importantes instalados en una subestación eléctrica de alta tensión
- Revisar normativa para el diseño de un laboratorio para practicas eléctricas
- Definir criterios y seleccionar los elementos para la práctica de protecciones en el laboratorio de electricidad
- Definir criterios y seleccionar el software de simulación de protecciones en sistemas eléctricos de potencia
- Disponer los elementos en el laboratorio para la práctica de protecciones eléctricas en AT y describir pasos para la programación del elemento de protección

- Elaborar plan de prácticas a ser realizadas en el laboratorio de prácticas de protecciones eléctricas
- Elaborar presupuesto del proyecto de modulo didáctico para la práctica de protecciones eléctricas.

5.8. BENEFICIARIOS

Los principales beneficiarios directos de este proyecto son los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, al tener un espacio donde podrán ver, manipular, simular y analizar diferentes situaciones reales en circuitos de potencia de subestaciones, que en otras circunstancias serian imposible. La Universidad Nacional de Caaguazú en su Facultad de Ciencias y Tecnología también se beneficiará al contar con un laboratorio único en su clase que posibilite formación profunda de sus estudiantes y pueda cumplir con las exigencias del mercado dejando en alto el nombre de la institución.

Los profesionales técnicos ajenos a la institución podrán acceder a procesos formativos dentro de la institución a través de cursos de protección realizados en el laboratorio de la facultad y con el banco didáctico como elemento de práctica, garantizando de esta forma la comprensión plena de los conceptos. De esta forma, un beneficio adicional para la FCyT sería el de generar ingreso para la institución en concepto de pago por los cursos realizados a terceros.

5.9. PRODUCTO

El producto del proyecto es el diseño de un laboratorio de prácticas para protecciones de sistemas eléctricos, definiendo todos sus elementos, como su disposición e interconexión en la sala de prácticas y el presupuesto necesario para su ejecución.

5.10. LOCALIZACIÓN FÍSICA Y COBERTURA ESPACIAL

El proyecto se localiza físicamente en la ciudad de Coronel Oviedo, específicamente en el Campus de la Universidad Nacional de Caaguazú. En la siguiente imagen puede visualizarse su ubicación en el mapa.

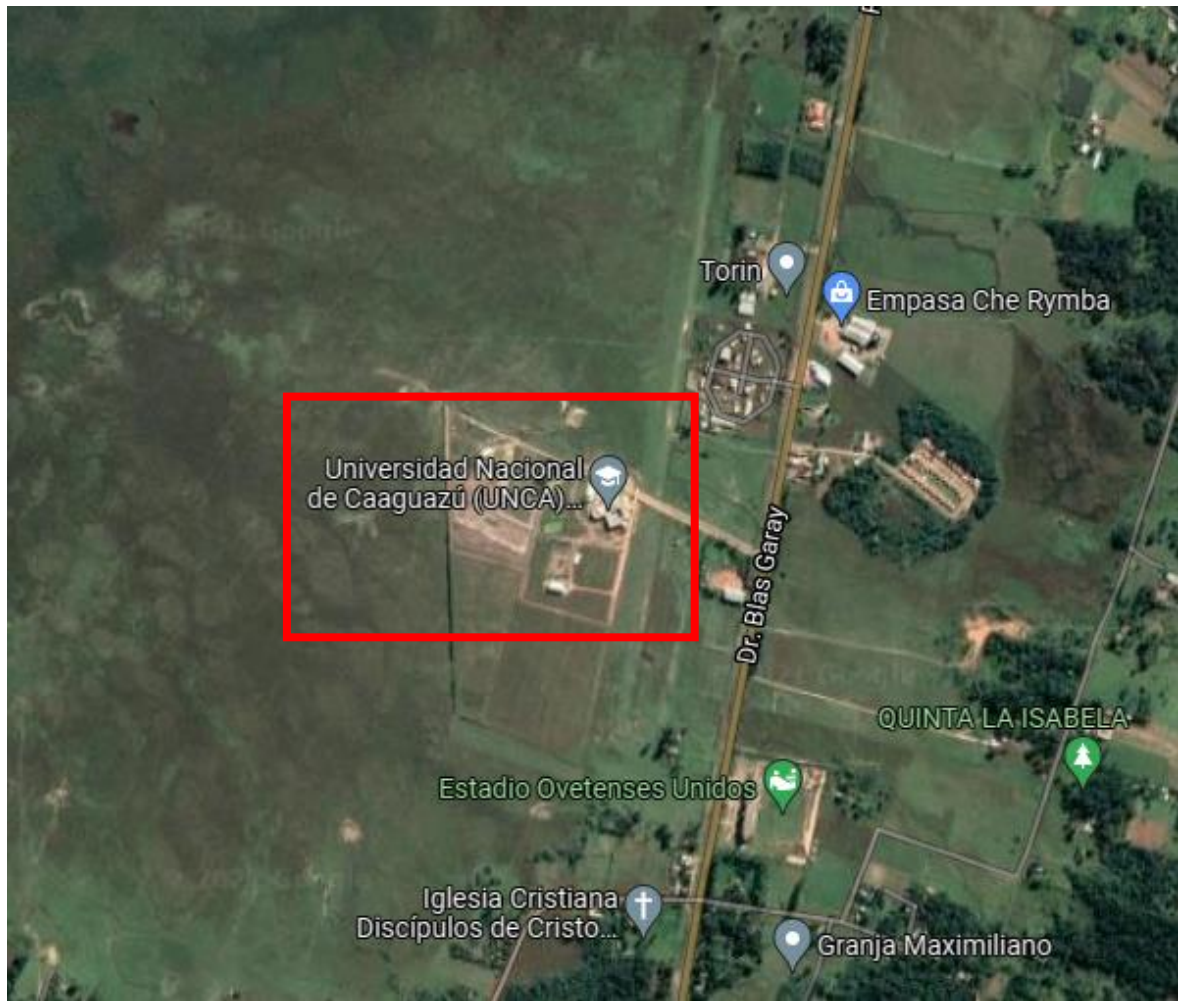


Figura 5.1: Localización geográfica

Para la obtención de los datos para el análisis técnico se han abarcado los departamentos de Caaguazú, San Pedro, Guaira, Caazapá y Paraguari.

Con el objetivo de reducir costos, el banco didáctico proyectado puede instalarse dentro del laboratorio existente en la universidad, en el futuro puede construirse un nuevo edificio destinado específicamente para prácticas de electricidad en sistemas de potencia en alta tensión. Como sugerencia, en el anexo se presenta un diseño tentativo de dicho edificio.

5.11. ESPECIFICACIONES DE ACTIVIDADES Y TAREAS REALIZADAS

- Revisión bibliográfica y visita técnica para la identificación y el estudio de sistemas de protección utilizados en subestaciones eléctricas del sistema de transmisión centro.
- Revisión y análisis de normas orientadas a la seguridad en laboratorios de prácticas de electricidad, al igual que las normas técnicas que rigen actualmente para el sistema de protección.
- Definición de criterios y selección de los elementos del sistema de protección a ser utilizado para la construcción del laboratorio de práctica.
- Definición de criterios y selección del software de simulación a ser instalado en el laboratorio para práctica de circuitos eléctricos de potencia.
- Diseño del espacio para practica en el laboratorio, definiendo la disposición de los equipos, su interconexión, su relación, etc.
- Elaboración de lista de prácticas para ser realizadas en el laboratorio de protecciones.
- Estimación del presupuesto para el proyecto de laboratorio de práctica de protecciones en sistemas eléctricos

5.12. FACTIBILIDAD TÉCNICA

Luego de la investigación y aplicando criterios de selección se logró conformar un esquema y ambiente de estudio factible mediante un dispositivo de protección de línea de transmisión a través de un relé programable multifunción de la marca ABB, acompañado de un probador de relé HT-802 y un software denominado DlgSILENT-Power Factory. Con estos equipos se podrá estudiar la protección, control y supervisión de una línea de transmisión, además de simular el comportamiento de dicha línea.

Finalmente, se elaboró además un plan de práctica de laboratorio cuyos principales contenidos se describen a continuación:

PLAN DE PRACTICAS PARA EL LABORATORIO DIDACTICO			
Nº DE PRACTICA	NOMBRE	EQUIPOS A UTILIZAR	CANTIDAD DE ALUMNOS POR PRACTICA
1	IDENTIFICACION DE LOS ELEMENTOS DEL LABORATORIO	Lista Impresa de elementos, diagramas.	5
2	IDENTIFICACION DE FUNCIONES DE ELEMENTOS EN UN SISTEMA DE PROTECCION	Cuaderno de anotaciones.	4
3	MEDISION Y COMPROBACION DE ESTADO DEL EQUIPO	IED, Provador de rele, computadora	5
4	INTRODUCCION A LA HERRAMIENTA DE PROGRAMACION	IED, Computadora, software	5
5	PROGRAMACION OFFLINE	IED, Computadora, software	4

5.13. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

La construcción del banco didáctico tendrá un costo de aproximadamente 15.304 USD. En la Tabla 4.9 de la Sección 6.1.9 del capítulo 6 – Ingeniería de diseño se indican los componentes del costo mencionado.

IV. INGENIERÍA DE DISEÑO

CAPITULO 6

DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO

6.1. IMPORTANCIA DE LABORATORIO DE PRÁCTICAS PARA PROTECCIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

6.1.1. Necesidad de un laboratorio

La Facultad de Ciencias y Tecnología tiene como objetivo formar profesionales en diferentes ramas de la Ingeniería, entre ellas la carrera de Ingeniería en Electricidad cuya misión es la de formar profesionales con los mejores niveles en conocimientos teóricos y prácticos. Dentro de la malla curricular vigente de la carrera de Ingeniería Eléctrica se estipula el desarrollo de las asignaturas de Protecciones de Sistemas Eléctricos 1 y 2, específicamente enfocados a sistemas de potencia en alta tensión, siendo una de las más importantes dentro de la especialidad de cara al futuro profesional.

El desarrollo teórico de los contenidos es realizado con normalidad por profesionales especialistas en la materia, no así la aplicación práctica de los conocimientos porque la institución no cuenta con un espacio didáctico para la visualización y práctica con elementos reales del sistema de protección en circuitos de potencia y tampoco cuenta con un sistema de software con la que se puedan realizar simulaciones.

Es importante recalcar que lo aprendido en forma teórica muchas veces resulta insuficiente para que los estudiantes logren comprender y asimilar adecuadamente los conocimientos de la referida materia. Muchos autores afirman que “el estrechamiento de las relaciones entre las actividades teóricas y prácticas previstas en los planes de estudios, es una estrategia útil para lograr la formación integral de los estudiantes de ingeniería” [13].

El presente proyecto se enfoca a las protecciones en sistemas eléctricos utilizados en subestaciones eléctricas de alta tensión por ser esta el área que más abarca la

asignatura de igual denominación y también por ser la tecnología que se encuentra a la vanguardia para esta área.

Como parte de la formación integral de los estudiantes se realizan programas de visitas guiadas a diferentes subestaciones eléctricas de la zona, estas visitas no cumplen con el nivel de desarrollo óptimo desde el punto de vista práctico, al resultar imposible la manipulación de los elementos de los circuitos de protección en dichos lugares. Para resolver ese problema, se deben crear espacios con condiciones similares a la existente en la realidad de tal forma que sea posible su modificación sin interferir con el sistema.

La mayoría de las subestaciones del sistema eléctrico nacional cuenta con equipamiento de última tecnología, con dispositivos inteligentes programables destinados específicamente a realizar las funciones de protección y en algunos casos también las de control y supervisión con sus respectivas normas de implementación y programación. A nivel de software, los dispositivos requieren de la programación con el lenguaje correcto, así como la simulación de ciertas condiciones con ya inyección de corrientes y tensión para confirmar su buen funcionamiento. Conocer estos sistemas es de vital importancia para el buen desenvolvimiento del profesional ingeniero en dicha área.

Como lo define el perfil de egreso de la carrera de Ingeniería Eléctrica, algunas capacidades deseables en el egresado de la carrera que guardan íntima relación con la asignatura se presentan a continuación:

- Capacidad de acoplar la teoría con la práctica
- Capacidad de adaptación a los cambios tecnológicos Planear, elaborar, ejecutar, supervisar y evaluar proyectos de instalación y/o mantenimiento eléctrico
- Dominio del conocimiento de máquinas y equipamientos eléctricos industriales

A partir de lo expuesto se evidencia la necesidad de un recurso didáctico (laboratorio didáctico) que sirva para la contextualización de los conocimientos teóricos adquiridos.

6.1.2. Sistema de protección de circuitos de potencia en las subestaciones

Antes de ahondar en el desarrollo del laboratorio es importante recordar los elementos de protección de circuitos de potencia más utilizados en una subestación eléctrica.

Como existe una necesidad de obtener ciertos datos de los equipos, las instalaciones y características varias de los elementos del sistema de protección eléctrica en subestaciones, se ha considerado como posible fuente de información el sistema de transmisión de energía eléctrica que abarca la zona de estudio, por su proximidad geográfica y su accesibilidad, en este caso específico corresponde al Sistema Centro de la ANDE.

Esta zona de la ANDE abarca subestaciones de los departamentos de Caaguazú, Guaira, Caazapá, San Pedro y Paraguarí, totalizando 14 subestaciones distribuidos en nivel de 220 y 66 kV. El grafico siguiente muestra la distribución con relación al nivel de tensión.

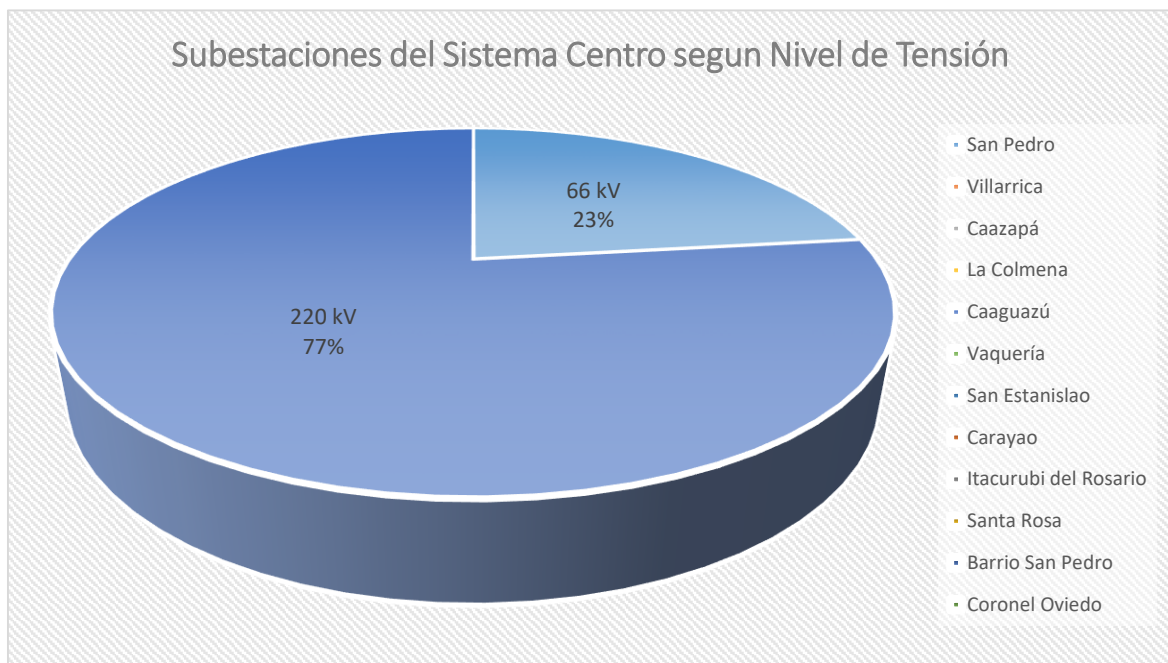


Figura 6.1: Subestaciones del Sistema Centro según nivel de tensión.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la revisión bibliográfica complementado con visitas técnicas a las subestaciones de la muestra seleccionada se han podido identificar los siguientes elementos principales del sistema de protección y por ende se desean replicar para las prácticas dentro del laboratorio:

- Dispositivo de protección (Relé)
- Interruptor de potencia
- Transformadores de corriente
- Transformadores de Tensión
- Fuentes de alimentación
- Circuitos auxiliares de control

La figura siguiente muestra un ejemplo con los elementos citados y su interconexión a nivel de campo.

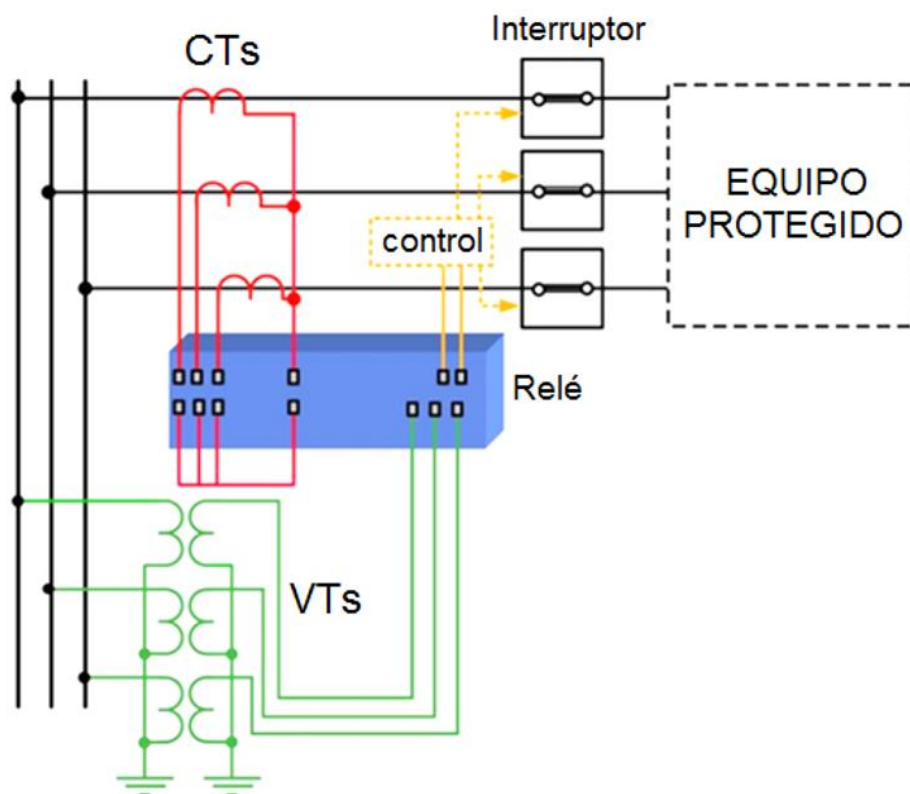


Figura 6.2: Elementos del sistema de protección [4]

La lista anterior se toma como punto de partida para seleccionar los elementos para la construcción del laboratorio de prácticas.

6.1.3. Condición actual del laboratorio de la institución

La FCyT cuenta con un laboratorio destinado para la práctica de diferentes asignaturas, como el Laboratorio de Automatización de Sistemas ubicado en el Campus de la Universidad Nacional del Caaguazú, fue montado gracias a la cooperación de la Korea International Cooperation Agency (KOICA) y la Gobernación del 5to. Dpto. Está equipado con bancadas de entrenamiento en electro-neumática y de PLC, cuenta con una capacidad para 30 alumnos [14].

En este laboratorio, los alumnos de las carreras de Ingeniería en Electrónica y Electricidad realizan prácticas de neumática, programación de PLC's y microcontroladores, sistemas SCADA con el Software LabView. Además, se imparten clases de Automatización y Control industrial, Robótica, Sistemas de Control, programación para monitoreo en tiempo real de procesos de producción, control de procesos y sistemas de control avanzado [14].

A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos del laboratorio didáctico existente:

6.1.3.1. Descripción de la Mini Bancada de entrenamiento con PLC - MPS Trainer

La bancada cuenta con los siguientes elementos:

Mini Multi Programming System Trainer

- Suministro de productos para proceso
- Transferencia de productos para proceso
- Inspección de proceso
- Parada de proceso
- Proceso de clasificación de procesos
- Proceso de carga
- Panel de control

PLC Control Trainer

- Sección Fuente de alimentación
- Sección CPU
- Módulo de entrada
- Módulo de salida
- Sección de entrada digital

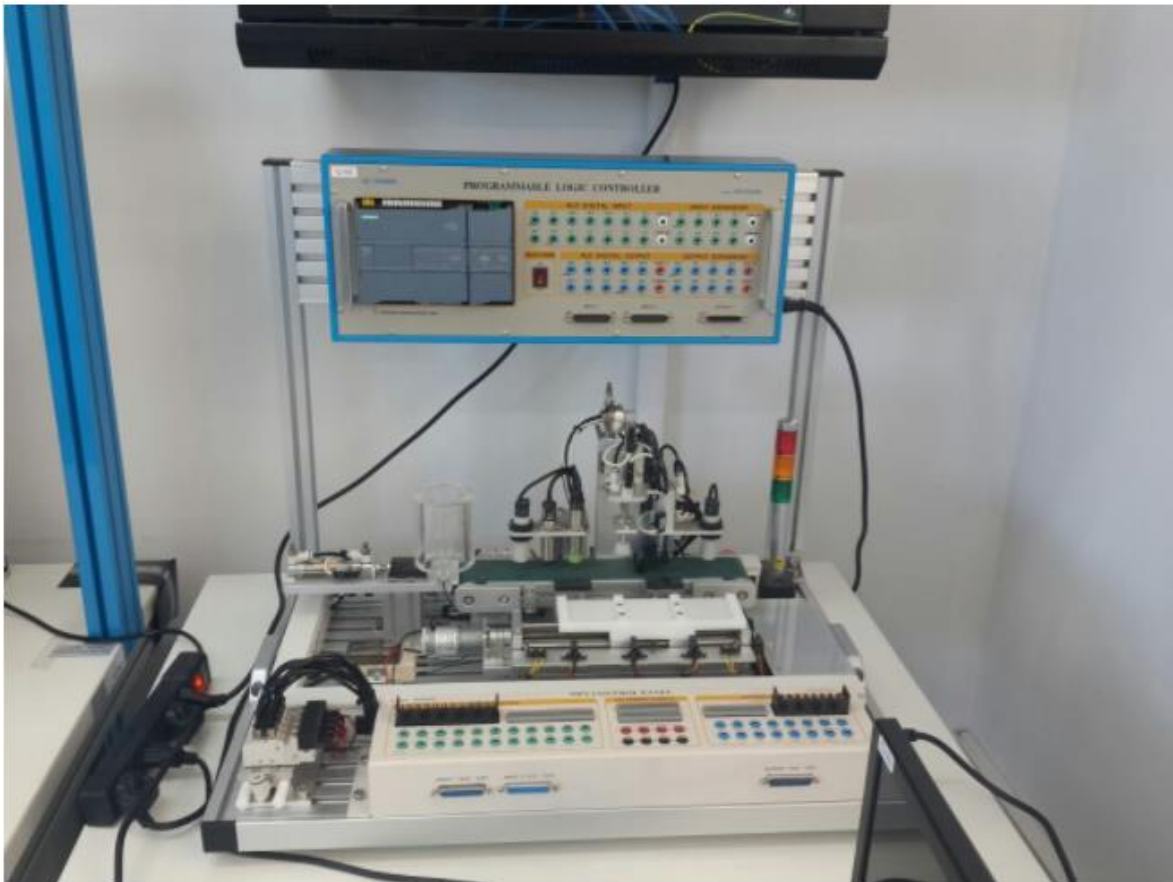


Figura 6.3: Mini Bancadas de entrenamiento con PLC - MPS Trainer

6.1.3.2. Descripción de la Bancadas de entrenamiento electro-neumático

La bancada cuenta con los siguientes elementos:

- Placa experimental para neumática
- Unidad de control neumático
- Distribuidor de Aire
- Válvula de control de flujo unidireccional
- Válvula de doble efecto (OR)

- Válvula de diferencia de presión (AND)
- Temporizadores neumáticos
- Cilindro neumático de simple acción
- Control de aire y de flujo.
- Válvulas solenoides
- Interruptor de presión
- Sensor óptico y de proximidad.
- 4 pares de módulo de relé
- Módulo de temporizador y de contador digital
- Modulo conmutación de señal de entrada
- Módulo de interruptor de emergencia
- Módulo de lámpara con bocina
- Compresor de aire de bajo ruido

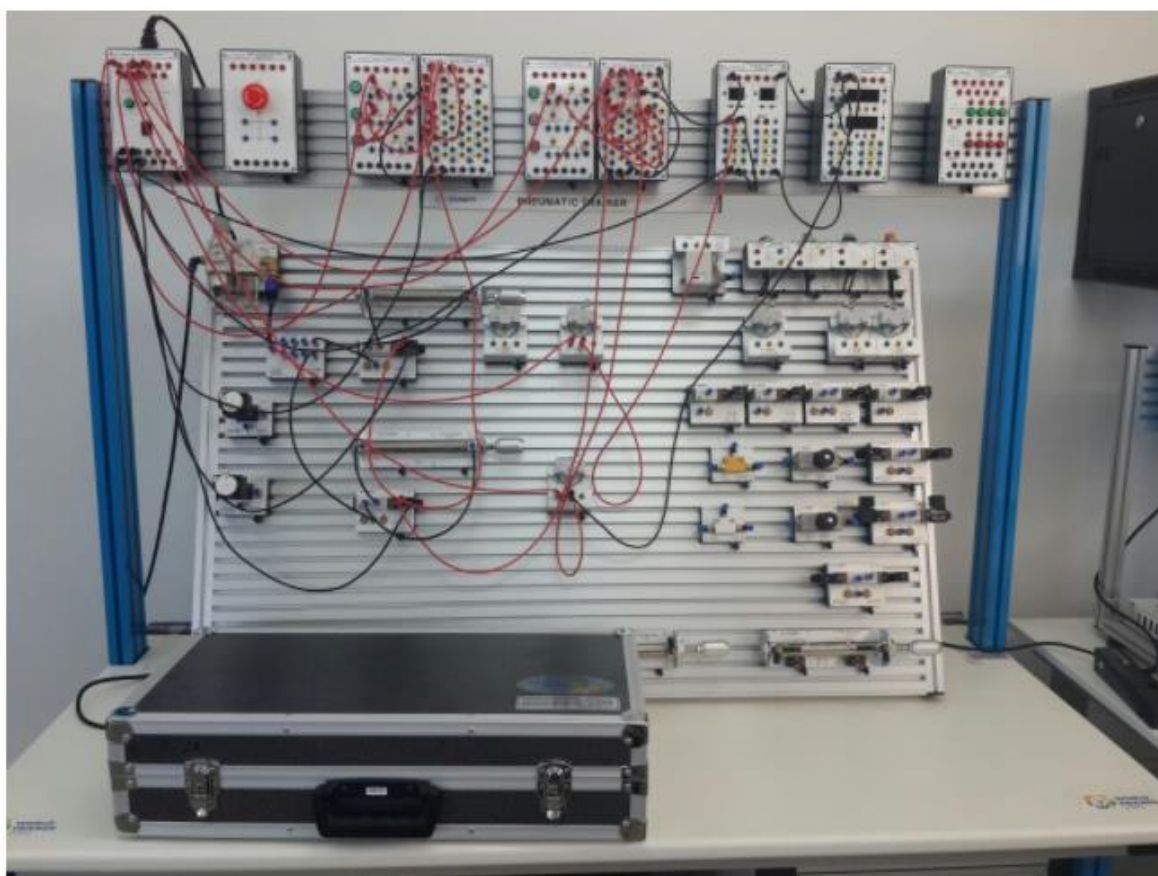


Figura 6.4: Bancadas de entrenamiento electro-neumático

6.1.3.3. Descripción de Módulos para control por PC

La bancada cuenta con los siguientes elementos:

- USB BUS
- Microcontrolador (ATMega 128)
- Unidad de Interface (BUS)
- Tablero de control (LED)
- Control de Interruptores de entrada
- Terminal de entrada 24V DC digital de 8 canales
- Terminal de salida 24V DC digital de 8 canales
- Tablero de control (7 segmentos)
- Tablero de motor DC
- Tablero de motor de paso
- Tablero externo de I/O



Figura 6.5: Módulos para control por PC

Antes de iniciar cualquier plan de diseño de un laboratorio o material didáctico que sirva como apoyo al fortalecimiento del aprendizaje. Es importante estudiar las normas que rigen el diseño, uso o manipulación de todo lo que involucre elementos de laboratorio de electricidad.

6.1.4. NORMATIVAS DE SEGURIDAD PARA PRACTICAS ELÉCTRICAS

El montaje de un laboratorio didáctico para práctica que involucra magnitudes eléctricas siempre tiene como elemento principal la seguridad de todos los involucrados en el proceso, por darse en una etapa aun de formación y es fundamental considerar este aspecto antes de encarar el proyecto.

En el sentido mencionado, existen normativas destinadas a preservar la seguridad en todos sus aspectos, estas son analizadas en los apartados siguientes.

6.1.4.1. Estándares internacionales

Como principal referencia se tendrá en cuenta la norma NFPA 70E que cubre los requisitos de seguridad eléctrica para los lugares de trabajo. Esta norma comprende la instalación de conductores eléctricos, equipos eléctricos, equipos de señalización conductores de comunicaciones, y canalizaciones en cualquier sistema eléctrico de potencia (SEP), como una sala eléctrica, subestación, patio AT o en algún otro recinto eléctrico, donde se lleven a cabo muchas tareas eléctricas.

Aunque la norma anterior especifica las condiciones de seguridad en lugares de trabajo, puede ser implementada también en laboratorios de prácticas eléctricas por reunir condiciones similares a las abarcadas por la norma.

Además de la NFPA 70E existen otras normas que deben considerarse durante las prácticas eléctricas tales como:

- IEC 60364-4-42 Second edition 2001 -08: Electrical Installations of Buildings - Part 4-42: Protection for Safety - Protection Against Thermal Effects.

Se aplica a las instalaciones eléctricas con relación a las medidas para la protección de las personas, los animales domésticos y la propiedad contra - los efectos térmicos, combustión o degradación de los materiales, y riesgo de quemaduras causadas por el equipo eléctrico.

- NEMA 250-2018: Enclosures for Electrical Equipment (1000 Volts Maximun).

Describe las especificaciones para brindar protección a los equipos cerrados contra condiciones ambientales específicas. El equipo eléctrico instalado bajo la guía de esta norma tiene una clasificación de 1000 voltios o menos y está diseñado para ser utilizado e instalado de una manera específica para su tipo.

- IEEE Std. 242-2001: IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems

Práctica recomendada para la protección y coordinación de sistemas eléctricos industriales y comerciales

- IEC 60364-4-41 Fourth edition 2001-08: Electrical Installations of Buildings - Part 4-41: Protection for Safety - Protection Against Electric Shock.

Protección para la seguridad - Protección contra descargas eléctricas.



Figura 6.6: Estándares internacionales

6.1.5. CRITERIOS Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL LABORATORIO DIDÁCTICO

Para la selección de los elementos más apropiado para el presente proyecto se deben definir los criterios de selección para asegurar la objetividad, pues los elementos citados anteriormente existen de diferentes variedades en fabricantes, modelos, aplicaciones, tamaños, tipos, etc. Además, se deben considerar otros aspectos como la disponibilidad de información al alcance como software, manuales de instalación, archivos asociados a la configuración, características técnicas, etc.

Considerando cada elemento del sistema de protección que serán los mismos o sus equivalentes desde el punto de vista didáctico para el laboratorio se presentan seguido algunos criterios a considerar a la hora de seleccionarlos.

6.1.5.1. Criterios para la selección del dispositivo de protección programable IED

Este elemento representa al “cerebro” del sistema de protección de cada circuito en una subestación, instaladas y programadas según las características y necesidades de cada circuito a proteger, aparecieron como reemplazo de los clásicos relés de protección tanto electromecánicos como digitales o numéricos.

De los datos obtenidos de las subestaciones seleccionadas como muestra para el desarrollo del proyecto, se presentan a continuación los criterios de selección y los datos recabados para el análisis.

Estos dispositivos en general vienen de dos tipos, las destinadas solamente a la protección y las que incluyen además funciones de monitoreo y control.

6.1.5.1.1. Teniendo en cuenta la función del dispositivo de protección

Según la función de protección del dispositivo se pueden encontrar cinco aplicaciones comunes dentro las subestaciones eléctricas:

- Para protección de línea
- Para protección del transformador
- Para protección de reactor
- Para protección de acoplador
- Para protección de las barras colectoras

A partir de la lista anterior es posible hacer una clasificación de los más utilizados según su función de protección y la cantidad de unidades instaladas en las subestaciones eléctricas a nivel de 220 kV del sistema de transmisión centro. De esta manera se tiene la siguiente tabla.

Subestación	Líneas	Transformador	Reactores	Acoplador
Coronel Oviedo	10	3	1	1
Carayaó	6	1	0	0
San Estanislao	3	2	0	1
Caaguazú	0	2	0	0
Paso pe	2	2	0	1
Avaí	0	1	0	0
Barrio San Pedro	0	1	0	0
Vaquería	0	1	0	0
Santa Rosa	2	2	0	1
Itacurubi del Rosario	0	1	0	0
TOTAL	23	16	1	4

Tabla 6.1: Cantidad de circuitos de cada subestación del sistema centro

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior pueden apreciarse los números de cada tipo de circuito de las subestaciones del sistema de transmisión centro a nivel de 220 kV. Se han seleccionados solamente las subestaciones que operan a nivel de 220 kV.

Considerando la función de protección de los dispositivos clasificados como relé de distancia para la protección de las líneas de transmisión, diferencial para protección

de barras y de los transformadores de potencia y de sobrecorriente para los acopladores de barra, se establece el primer criterio para la selección del IED a ser utilizado.

Elemento a proteger	Función de Protección
Transformador de Potencia	Relé Diferencial
Línea de Transmisión	Relé de Distancia
Acoplador de Barras	Relé de Sobrecorriente
Barras Colectoras	Relé Diferencial
Reactores	Relé Diferencial

Tabla 6.2: Tabla de funciones de protección

Fuente: Elaboración propia

De este modo, considerando el criterio de la función más utilizada en las subestaciones del sistema centro y la Tabla 6.1 que indica la cantidad mayor de líneas de transmisión, se selecciona un dispositivo con la función de protección de línea que incorpora como elemento de protección principal un relé de distancia con otras protecciones de respaldo.

6.1.5.1.2. Según fabricante

Del fabricante dependen diversos aspectos para completar el diseño con más detalle el proyecto, pues es necesario considerar la configuración y parametrización dispositivo y estos pasos dependen de ciertas características que cada fabricante gestiona de diferentes maneras. Entre las características puede mencionarse la herramienta de configuración de software proveída por los mismos fabricantes, la disponibilidad de estos en la mayoría de los casos está sujeta a la adquisición del dispositivo. Por lo tanto, el acceso gratuito a los recursos para la programación y parametrización del equipo sin su adquisición física es uno de los criterios principales para seleccionar el fabricante.

Luego de una búsqueda exhaustiva de información sobre diferentes fabricantes de relés de protección en internet se han seleccionado una lista de diferentes fabricantes y de reduciéndola considerando los equipos instalados en el sistema de transmisión centro de la ANDE, presentados en la tabla siguiente.

Subestación	Relé de distancia (21)	Relé diferencial (87)	Relé de sobrecorriente (50/51)
Coronel Oviedo	SEL	SEL, ZIV	EFACEC
Carayaó	ABB	ABB	ABB
San Estanislao	INGETEAM	INGETEAM	INGETEAM
Caaguazú	SEL	SEL, ZIV	EFACEC
Paso pe	INGETEAM	INGETEAM	INGETEAM
Avaí	INGETEAM	INGETEAM	INGETEAM
Barrio San Pedro	SEL	SEL	SEL
Vaquería	INGETEAM	INGETEAM	INGETEAM
Santa Rosa	SEL	SEL	SEL
Itacurubi del Rosario	INGETEAM	INGETEAM	INGETEAM

Tabla 6.3: Fabricantes de dispositivo de protección instalados en el Sistema Centro

Fuente: Elaboración propia

Es así que se tiene en la tabla siguiente una lista de las características asociadas a los diferentes fabricantes utilizados en las subestaciones con niveles de 220 kV y los datos encontrados en internet.

Las características presentadas son consideradas como criterios para la selección del fabricante. El cumplimiento en mayor medida con las características se toma como favorable y permitirá el desarrollo en detalle del presente proyecto.

FABRICANTE	Software libre de prueba para el desarrollo del presente proyecto	Compatibilidad con la norma IEC61850	Archivos de pre-configuración accesibles	Modo de configuración offline sin requerir de un IED físico	Observaciones
SEL	SI	SI	SI	SI	Archivos de preconfiguración accesibles con autorización del fabricante
ABB	SI	SI	SI	SI	
INGETEAM	NO	SI	NO	-	Modo de configuración offline depende del acceso al software
ZIV	NO	SI	NO	-	
EFACEC	NO	-	NO	-	La serie utilizada corresponde solamente a control y automatización

Tabla 6.4: Comparación de dispositivos de protección de diferentes fabricantes

Fuente: Elaboración propia

Entre otras características también se tiene en cuenta la compatibilidad del dispositivo con la norma IEC61850 de la primera o segunda edición. La información anterior es importante para ser abordado dentro de la asignatura de protecciones eléctricas y la configuración de equipos.

En la Tabla 6.4 puede notarse que solamente dos fabricantes ofrecen el software de configuración sin la adquisición física del dispositivo de protección; en uno de

los cuales solamente es posible a través de un correo de solicitud al fabricante. Esto se resume en la tabla siguiente.

FABRICANTE	Software libre de prueba para el desarrollo del presente proyecto	Compatibilidad con la norma IEC61850	Archivos de pre-configuración accesibles	Modo de configuración offline sin requerir de un IED físico	Observaciones
SEL	SI	SI	SI	SI	Archivos de preconfiguración accesibles con autorización del fabricante
ABB	SI	SI	SI	SI	

Tabla 6.5: Fabricantes con mayor grado de cumplimiento

Fuente: Elaboración propia

El archivo de pre-configuración necesario para la configuración del equipo es otra característica que en general no se tiene disponible para todos los fabricantes, resultando los dos fabricantes anteriores como únicos que ofrecen el archivo.

De esta manera, como se aprecia en la Tabla 6.5, de entre las alternativas estudiadas, solamente el fabricante ABB brinda acceso a los software y archivos de configuración sin la adquisición física de los equipos de protección.

Verificando el catálogo del fabricante seleccionado, se pueden encontrar numerosas alternativas en cuanto a la función de protección de línea, encontrando modelos exclusivos para protección de líneas de transmisión sin función de monitoreo y control; otros modelos en cambio son multifuncionales, es decir poseen numerosas funciones incluidas en un solo equipo, incluidas la función de control y monitoreo. Como el laboratorio de la Institución puede ser utilizado por diferentes cursos, y diferentes niveles de conocimiento, pudiendo ser utilizado también para el desarrollo de la asignatura de Estaciones eléctricas, es preferible seleccionar un dispositivo multifunción para su montaje en el laboratorio de prácticas.

Por lo mencionado, se selecciona el dispositivo ABB REL670 para el desarrollo con detalle del presente proyecto. En el apartado dedicado a la presentación de los elementos y sus características se presentan los detalles del dispositivo seleccionado.

No obstante, no se descarta la posibilidad de la adquisición de otro fabricante a la hora de implementar el proyecto, como se ha mencionado, con la adquisición del dispositivo físico se soluciona el problema relacionado al software de programación y del soporte técnico.

6.1.5.2. Criterios para la selección del interruptor de potencia

El interruptor de potencia en este caso, por tratarse solamente de un laboratorio de práctica, será reemplazado por un actuador electromecánico, con contactos auxiliares para brindar la posibilidad de visualizar la actuación del sistema de protección con diferentes tipos de fallas que puedan presentarse en las líneas de transmisión.

El único criterio que debe cumplir es que la capacidad de corriente sea suficiente para la señalización, pues no manejarán cargas elevadas, en cuanto al nivel de tensión para el comando del contactor el criterio es que posea valor bajo que según normas sea apropiado para prácticas de laboratorio. De esta forma, cualquier contactor disponible en el mercado local que cumpla con las características mencionadas podrá ser utilizado para la simulación del interruptor. Con los respectivos contactos auxiliares podrán señalizarse la posición del interruptor en el panel de prácticas.

La figura siguiente muestra un interruptor de potencia utilizado en subestaciones eléctricas.



Figura 6.7: Interruptor de potencia a ser simulado

6.1.5.3. Criterios para la selección de transformadores de tensión y de corriente

Del mismo modo que el interruptor de potencia, por tratarse de un espacio creado para práctica de laboratorio no es necesario ni posible construirla a nivel de 220 kV como en las instalaciones reales dentro de las subestaciones de potencia, tampoco para que maneje cargas de corriente nominales de los circuitos de potencia, por esta razón los transformadores tanto de corriente como de tensión, cuya función es la de reducir valores altos de magnitudes de corriente y de tensión a valores medibles no serán necesarios en forma física.

No obstante, para mejorar la comprensión de los conceptos durante las prácticas de laboratorio orientado a los sistemas de protecciones en subestaciones eléctricas, será necesario crear de forma artificial unas condiciones de fallas del circuito de potencia que normalmente se presentan en las líneas de transmisión.

Para lograr el objetivo de crear las condiciones mencionadas, se seleccionará un equipo inyector de corriente y tensión que algunos fabricantes denominan maletín de pruebas de relés o simplemente probador de relé, destinados para las pruebas de los relés de protección, considerando algunos criterios de selección.

Entre los criterios a considerar se pueden mencionar los siguientes:

- Interfaz HMI incorporada
- Lista de funciones acorde a las necesidades del proyecto
- Representante y soporte técnico local
- Aplicable a protección de línea
- Reporte de prueba
- Costo aproximado

En el siguiente aparatado se describen brevemente los equipos de prueba de relés o inyectores de corriente y tensión de diferentes fabricantes teniendo en cuenta los criterios antes mencionados.

6.1.5.4. Lista de probadores de relé con sus características técnicas para comparación

6.1.5.4.1. OMICRON CMC 356

6.1.5.4.1.1. Descripción

La unidad CMC 356 es la solución universal para probar todas las generaciones y tipos de relés de protección. Sus seis potentes fuentes de corriente (modo trifásico: hasta 64 A / 860 VA por canal) con un gran rango dinámico, permiten probar hasta los relés electromecánicos de alta carga con una demanda de potencia muy alta.

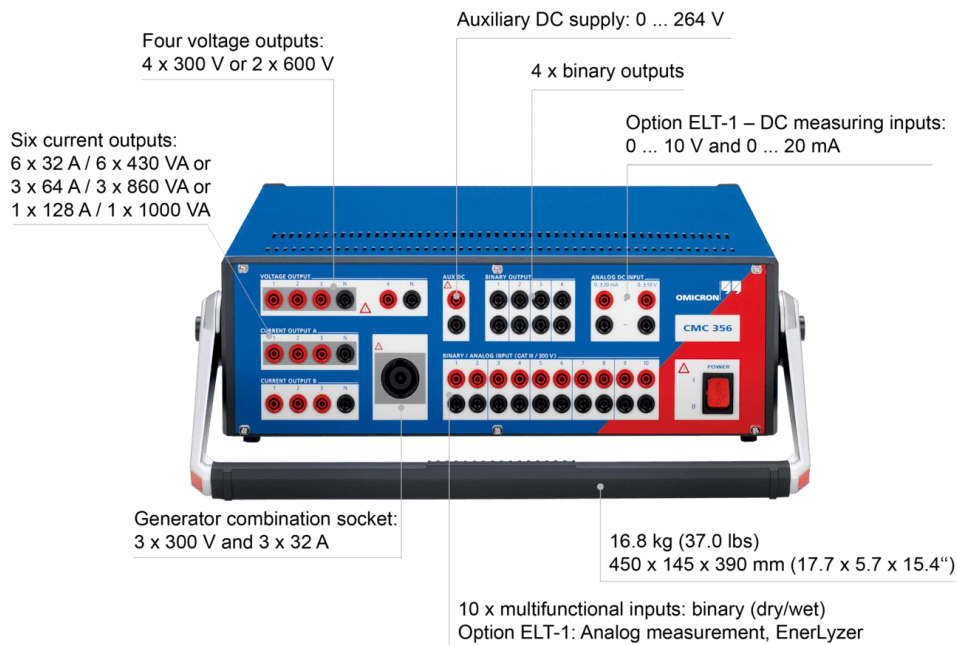


Figura 6.8: Partes principales del Omicron CMC

La unidad CMC 356 es la opción ideal para aplicaciones que requieren la más alta versatilidad, amplitud y potencia. Los ingenieros y técnicos de puesta en servicio aprecian especialmente su capacidad de realizar comprobaciones de cableado y plausibilidad de los transformadores de corriente, mediante la inyección primaria de altas corrientes desde el equipo de prueba [15].

6.1.5.4.1.2. Características técnicas

Equipo de prueba de relés de protección:

- Relés electromecánicos de alta carga
- Relés estáticos
- Relés numéricos
- IED IEC 61850 (GOOSE y Sampled Values)
- Paneles de protección
- Pruebas de extremo a extremo con GPS o IRIG-B
- Protección de barras (hasta 22 generadores de señal)

Herramienta universal para la puesta en servicio de subestaciones:

- Comprobación de indicaciones SCADA

- Medición de carga
- Comprobador de polaridad de TC/TT
- Verificador del cableado
- Comprobación de plausibilidad para TC/TT con inyección primaria

Simulador de sistemas de potencia:

- Simulación de falla transitoria
- Oscilación de potencia
- Simulación de saturación de TC
- Simulación de IP
- Simulación de bobina Rogowski
- Red compensada
- Reproducción de transitorios (COMTRADE, PL4 (EMTP), ...)

Fuente de tensión y corriente programable:

- Garantía de la calidad de la producción
- Fabricantes de equipos de subestación
- Investigación y desarrollo

Dispositivo portátil de medida de 10 canales (con la opción de hardware ELT-1 y la opción de software EnerLyzer™):

- Registro transitorio (trigger: binario, PQ, GPS)
- Multímetro para: I, V, f, S, P, Q, $\cos \Phi$...
- Registro de tendencias para: I, V, f, S, P, Q
- Análisis de armónicos

6.1.5.4.2. MEGGER FREJA 546

6.1.5.4.2.1. Descripción

El MEGGER FREJA 546 es un sistema de pruebas de relé multifunción, liviano y portátil para trabajo de campo de Megger. La unidad se puede manejar manualmente gracias a la interfaz de usuario con pantalla táctil integrada. La interfaz de usuario integrada es la segunda generación de software de interfaz manual de usuario automática/semiautomática que utiliza el software FREJA Local.

La gran pantalla táctil TFT LCD de alta resolución y alta definición a todo color es muy fácil de leer y permite al usuario realizar pruebas manuales, en régimen permanente y dinámico, de manera rápida y sencilla [16].



Figura 6.9: Probador de relé MEGGER FREJA-546

El FREJA 546 está diseñado principalmente para realizar pruebas secundarias de relés de protección. Se puede probar prácticamente cualquier tipo de relé [16].

6.1.5.4.2.2. Características técnicas

- Pruebas totalmente automatizadas con el software FREJA Win
- Operación autónoma utilizando una intuitiva pantalla táctil gráfica de alta resolución, sin necesidad de operar con PC
- Salida de alta corriente, alta potencia – Hasta 60 A/300 VA RMS por fase
- 4 canales de tensión y 3 canales de corriente, que con los canales de tensión convertibles proporciona 1 tensión y 6 corriente
- Función de pruebas dinámicas de extremo a extremo sincronizadas por GPS
- Función de pruebas conforme a IEC 61850

6.1.5.4.3. SMC QUASAR

6.1.5.4.3.1. Descripción

El Quasar se ha diseñado para funcionar en las condiciones más exigentes como temperaturas extremas, polvo o transporte agresivo. El equipo está encapsulado

en una carcasa ABS que incorpora ruedas y un asa extensible, resultando muy fácil de transportar sin añadir el tamaño, el peso y el coste de una maleta separada. Todas las conexiones se identifican fácilmente en la superficie frontal y la tapa puede retirarse si estorba con sólo deslizarla hacia un lado. El Quasar es un instrumento preciso, rápido y eficaz. Usted podrá obtener un informe del funcionamiento de cualquier protección con sólo conectarlo al relé y seleccionar el proceso específico de prueba previamente preparado y almacenado en su tablet Android o en su ordenador Windows [17].



Figura 6.10: Probador de relé SMC QUASAR

6.1.5.4.3.2. Características técnicas

- Canales: 4 x 300V y 3 x 60A, configurable para 7 canales de intensidad
- 6 entradas y 4 salidas binarias
- Medida de intensidad y tensión externas en c.c.
- 6 salidas de bajo nivel para inyectar en sensores, medidores etc., y para añadir más canales
- Wi-Fi incorporada, LAN Ethernet, puerto dedicado para IEC-61850 y puerto de expansión
- Reparable y ampliable in situ

6.1.5.4.4. DOBLE F6150e

6.1.5.4.4.1. Descripción

El equipo F6150e de Doble es un equipo de pruebas versátil para las pruebas de relés y esquemas de protección. Este simulador de sistema de potencia realiza desde las pruebas más sencillas hasta las más complejas. El equipo F6150e está disponible en distintas configuraciones y satisface todas sus necesidades de pruebas de relés de protección [18].



Figura 6.11: Probador de relé DOBLE F6150e

Si necesita probar un componente específico o todo un esquema, el equipo F6150e es la solución comprobada para evaluar el rendimiento del sistema de protección.

6.1.5.4.4.2. Características técnicas

- Realiza pruebas de calibración estándar, pruebas de verificación de relés con alta carga y a relevadores microprocesados.
- Pruebas a dispositivos con entradas analógicas de 1 A y 5 A
- Realiza pruebas de simulación de estado y transitorias
- Pruebas a Transformadores de Corriente (TC) de medición clase 0.2 y pruebas a transductores.

- Implementa pruebas punto a punto de esquemas con sincronización de tiempo por GPS.
- Máximo de 12 fuentes (seis de voltaje y seis de corriente) configurables para pruebas de banco y pruebas de conceptos complejos.
- Proporciona plena potencia de VA con cargas resistivas, inductivas y capacitivas a una corriente nominal máxima (6 de 35 A, 3 de 70 A y 1 de 210 A)
- Controle todas las fuentes desde una tableta para las pruebas de protección manuales y básicas

6.1.5.4.5. PONOVO PW460

6.1.5.4.5.1. Descripción

PW460, la unidad de prueba de relés de protección es el equipo de prueba completo para todo tipo de relés de protección con alta exactitud. Este equipo de prueba tiene la función incorporada de monitoreo y de grabación de las salidas, y también soporta la prueba de relés digitales IEC61850 [19].



Figura 6.12: Probador de relé PONOVO PW460

PW460 el dispositivo de prueba ideal para todas las empresas eléctricas, centrales eléctricas, fabricantes de relés, fabricantes de paneles, institutos de investigación, universidades, empresas de pruebas, etc [19].

6.1.5.4.5.2. Características técnicas

- 6*15A, 4*300V
- CC auxiliar (0-300V), entradas de medición CC
- 12 entradas binarias, 8 salidas binarias
- Umbral ajustable (0-400V) para entradas binarias
- Funciones incorporadas de monitoreo y grabación analógicos
- Se puede actualizar para soportar pruebas de relés en base a IEC61850
- Monitoreo y grabación integrados
- Alta exactitud
- Interfaz de amplificador de corriente para probar relés de alta carga
- Más de 500 plantillas de prueba ofrecidas gratuitamente para diferentes relés a fin de realizar pruebas automáticas.
- Admite la importación de valores de configuración de relés a través de XRIO convirtiendo en archivos predeterminados del software Powertest de PONOVO automáticamente en plantillas de relés

6.1.5.4.6. HT-802 Protection Relay Test Set

6.1.5.4.6.1. Descripción

La placa de control principal es la arquitectura DSP + FPGA, salida DAC de 16 bits, genera una onda sinusoidal de alta densidad 2000 puntos cada círculo a la onda fundamental, lo que mejora en gran medida la calidad de la onda y la precisión del instrumento de prueba.



Figura 6.13: Probador de relé HT-802

Interfaz de operación clásica de Windows XP, amigable interfaz hombre-máquina, fácil y rápido de operar; Computadora de control industrial integrada de alto rendimiento y resolución de 8.4 pulgadas de pantalla de color verdadero TFT de 800 × 600 que proporciona buena información visual, incluye las condiciones de trabajo actuales y todo tipo de información de ayuda. El software posee función de auto calibración [20].

6.1.5.4.6.2. Características técnicas

Fuente de corriente alterna

- Salida de corriente de fase (RMS): 0 ~ 40A / fase; precisión: 0,5%
- Salida trifásica en paralelo (RMS): 0 ~ 120A
- Valores de corriente de fase permitidos para trabajar durante mucho tiempo (RMS): 10A
- Potencia de salida máxima de corriente de fase: 420VA
- Potencia máxima de salida de corriente trifásica en paralelo: 900VA
- Salida máxima de corriente trifásica en paralelo tiempo de trabajo permitido: 10 s
- Rango de frecuencia: 0 ~ 1000Hz ; precisión: 0.001Hz

- Orden entonada: 2 ~ 20; fase: 0 ~ 360 °; precisión: 0,1 °

Fuente de corriente continua

- Salida de corriente: 0 ~ ± 30A / fase; precisión: 0,5%

Fuente de voltaje CA

- Salida de voltaje de fase (RMS): 0 ~ 125V / fase, precisión: 0.5%
- Salida de voltaje de línea (RMS): 0 ~ 250V
- Potencia de salida de tensión de fase / tensión de línea: 75VA / 100VA
- Rango de frecuencia: 0 ~ 1000Hz precisión: 0.001Hz
- Orden entonada: 2 ~ 20; fase: 0 ~ 360 °; precisión: 0,1 °

Fuente de voltaje DC

- Rango de salida de voltaje de fase: 0 ~ ± 150V precisión: 0.5%
- Rango de salida de voltaje de línea: 0 ~ ± 300V
- Potencia de salida de tensión de fase / tensión de línea: 90VA / 180VA

Terminal de conmutación

- Terminales de entrada del interruptor: 8 pares
- Contacto muerto: 1-20mA, salida activa de 24V dentro del dispositivo.
- Voltaje potencial: 0--6 V CC bajo nivel; 15-250 V CC de alto nivel
- Terminales de salida del interruptor: 4 pares, contacto muerto, capacidad de ruptura: 110V / 2A, 220V / 1A

Rango de medición de tiempo

- Rango: 1 ms ~ 9999 s
- Precisión: 1 ms

6.1.5.5. Tabla comparativa de los probadores de relés

En la tabla siguiente se puede observar una pequeña comparación de los diferentes probadores de relés también conocidos como maleta de prueba de relé.

CRITERIO/FABRICANTE	OMICRON CMC 356	MEGGER FREJA 546	SMC QUASAR	DOBLE F6150e	PONOVO PW460	HT 802
Interfaz HMI incorporada	NO	SI	NO	NO	NO	SI

Lista de funciones acorde a las necesidades del proyecto	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Representante y soporte técnico local	SI	SI	SI	NO	NO	NO
Aplicable a protección de línea	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Reporte de prueba	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Costo aproximado	40.000 USD	40.000 USD	32.000 USD	50.000 USD	25.000 USD	4.500 USD

Tabla 6.6: Comparación de equipos de prueba de relé

Fuente: Elaboración propia

Con relación a los criterios mencionados anteriormente y el análisis de la tabla anterior se realizan las siguientes acotaciones:

- De los probadores analizados se observan que solamente dos poseen interfaz HMI incorporado en el equipo, el resto requiere del uso de una computadora externa.
- En cuanto a las funciones que poseen la mayoría de los probadores universales, se concluye que están preparadas para la prueba de las protecciones principales utilizadas en las subestaciones eléctricas y por lo tanto cumplen con el criterio para este proyecto.
- Las marcas más conocidas a nivel local poseen representantes en el país, no así las de origen asiático.
- Existen fabricantes más renombrados, los equipos de los mismos poseen funciones avanzadas como la simulación por software de las funciones de protección y son capaces de establecer una comunicación con los dispositivos de protección pues incorporan protocolos de comunicación compatibles con la norma IEC 61850. Los otros fabricantes no poseen funciones tan avanzadas, pero para los fines didácticos del proyecto pueden cumplir con la función requerida.
- En relación al costo de los equipos existen marcadas diferencias entre los modelos analizados. Los fabricantes más especializados con sus modelos

analizados tienen costos muy elevados que rondan por los 40000 USD. Mientras que los de gama inferior cuestan hasta 10 veces menos pero también cumplen con las condiciones necesarias.

Como conclusión de este aparatado decimos que el probador de relé seleccionado cumple con las pautas mínimas requeridas a un menor precio de adquisición.

El dispositivo probador de relé seleccionado para el laboratorio corresponde al HT-802 Protection Relay Test Set.

6.1.5.6. Criterios para la selección de elementos auxiliares y de control

Los criterios para seleccionar estos elementos son primeramente la disponibilidad en el mercado local y compatibilidad con las tensiones de trabajo de todos los elementos de la bancada.

Los elementos auxiliares son:

- Fuentes de alimentación
- Led señalizadores
- Cables de interconexión
- Panel de montaje
- Protecciones para circuitos de la bancada
- Conectores tipo banana
- Borneras de conexión

6.1.6. CRITERIOS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Para la selección del software de simulación del laboratorio serán definidos los criterios teniendo en cuenta los siguientes:

- Funciones de Simulación orientada a protecciones
- Interfaz intuitivo
- Tipo de Licencia
- Requerimientos en cuanto a hardware

En el aparatado siguiente se desarrollan breves descripciones de los softwares de simulación más conocidos a la luz de los criterios antes mencionados. Estos en

general poseen licencia comercial, en otros casos existen softwares comerciales que ofrecen licencia especial para universidades o estudiantes.

6.1.6.1. Lista de software con sus características técnicas para comparación

6.1.6.1.1. DlgSILENT - Power Factory

DlgSILENT PowerFactory, una de las herramientas para análisis de sistemas eléctricos que existen en el mercado, la cual satisface ampliamente los requerimientos de operación, mantenimiento, planeación y estudios de cualquier empresa de electricidad en el ámbito nacional e internacional, en las áreas de Sistemas eléctricos de potencia en sus diferentes niveles de aplicación [21].

6.1.6.1.1.1. Funciones de simulación

DlgSILENT PowerFactory incorpora una gran variedad de funciones de simulación que se listan a continuación [22]:

- Flujos de Potencia
- Análisis de fallas
- Análisis de redes de bajo voltaje
- Optimización de redes de distribución
- Simulación Dinámica
- Simulación de Transitorios Electromagnéticos
- Análisis Modal
- Análisis de Protecciones
- Análisis de Armónicos
- Análisis de Confiabilidad
- Análisis de Estabilidad de Voltaje
- Análisis de Contingencias
- Modelado de dispositivos electrónicos de potencia
- Compatibilidad con otros programas de simulación como PSS/E

6.1.6.1.1.2. Interfaz gráfica

DlgSILENT PowerFactory posee una interfaz gráfica muy amigable para el usuario en ella es posible encontrar diferentes tipos de barras y áreas de trabajo. La Figura muestra la interfaz gráfica del programa [22].

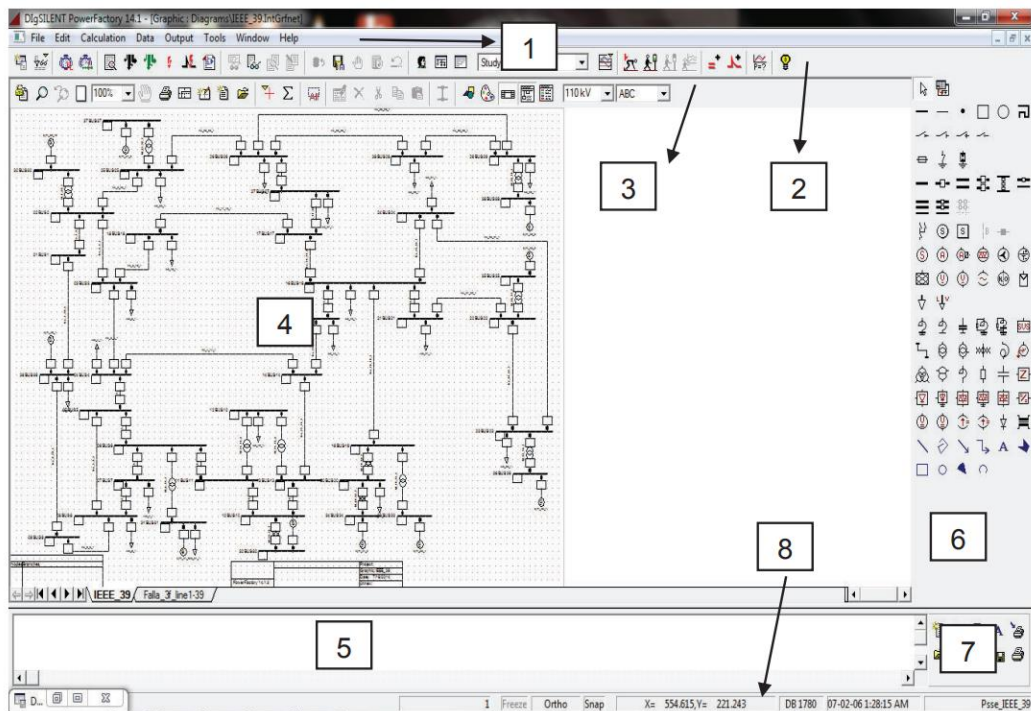


Figura 6.14: Interfaz Gráfica de PowerFactory

A continuación, se detallan las partes más relevantes de la interfaz gráfica:

1. Barra de menús
2. Barra de herramientas
3. Barra de opciones gráficas
4. Área de trabajo
5. Área de resultados
6. Herramientas gráficas
7. Herramientas del área de resultados
8. Barra de estado

6.1.6.1.1.3. Tipos de licencia

Las licencias de PowerFactory se ofrecen en las categorías comerciales (PF4C) y licencias de investigación / educativas (PF4R / PF4E).

Hay licencias especiales disponibles para estudiantes (PF4S / PF4T) [21].

- **Licencia comercial (PF4C)**

Esta licencia es una licencia estándar para uso comercial.

Funciones: el paquete se puede configurar individualmente según las necesidades específicas del usuario

Número de nodos: 100/250/500 / ilimitado

Licencia: tecla programable o llave USB

Soporte, mantenimiento y actualizaciones de software ya incluidas durante los primeros 12 meses, prorrogables anualmente mediante una suscripción de mantenimiento [21].

- **Licencia de investigación (PF4R)**

Esta licencia se ofrece a instituciones académicas y de investigación para su uso en proyectos de investigación financiados con fondos públicos, es decir, proyectos financiados por gobiernos u otras organizaciones sin fines de lucro. No se permite el uso comercial.

Funciones: paquete predefinido que incluye funciones básicas y las siguientes funciones avanzadas: análisis de contingencia, simulación cuasi-dinámica, reducción de red, funciones de protección (tiempo-sobrecorriente y distancia), análisis de arco eléctrico, análisis de cables, calidad de energía y análisis armónico, conexión Solicitar evaluación, herramientas de red de transmisión, herramientas de red de distribución, análisis probabilístico, funciones de análisis de confiabilidad, flujo de potencia óptimo II (OPF I y despacho económico), análisis tecnoeconómico, estimación de estado, funciones de análisis de estabilidad (RMS), transitorios electromagnéticos (EMT) , Estabilidad de señales pequeñas (Análisis de valores propios), Identificación de parámetros del sistema, Scripting y Automatización.

Número de nodos: ilimitado

Licencia: tecla programable o llave USB

Soporte, mantenimiento y actualizaciones de software ya incluidas durante los primeros 12 meses, prorrogables anualmente mediante una suscripción de mantenimiento [21].

- **Licencia de educación (PF4E)**

Esta licencia se ofrece a universidades y otras instituciones académicas con fines educativos. La licencia es especialmente adecuada para su uso en cursos prácticos de hasta 25 estudiantes. No se permite el uso comercial.

Funciones: paquete predefinido que incluye funciones básicas y las siguientes funciones avanzadas: análisis de contingencia, simulación cuasi-dinámica, reducción de red, funciones de protección (sobrecorriente y distancia de tiempo), análisis de arco eléctrico, análisis de cables, análisis de armónicos y calidad de energía, conexión Solicitar evaluación, herramientas de red de transmisión, herramientas de red de distribución, análisis probabilístico, funciones de análisis de confiabilidad, flujo de potencia óptimo II (OPF I y despacho económico), análisis tecnoeconómico, estimación de estado, funciones de análisis de estabilidad (RMS), transitorios electromagnéticos (EMT) , Estabilidad de señales pequeñas (análisis de valores propios), Identificación de parámetros del sistema, Scripting y Automatización

Número de nodos: 50

Licencia: tecla programable o llave USB

Soporte limitado y actualizaciones de software

- **Licencia de estudiante (PF4S)**

Esta licencia se ofrece a estudiantes individuales que tengan una tarjeta de identificación de estudiante válida. No se permite el uso comercial.

Funciones: paquete predefinido que incluye funciones básicas y las siguientes funciones avanzadas: análisis de contingencia, simulación cuasi-dinámica, reducción de red, funciones de protección (sobrecorriente y distancia de tiempo), análisis de arco eléctrico, análisis de cables, análisis de armónicos y calidad de energía, conexión Solicitar evaluación, herramientas de red de transmisión, herramientas de red de distribución, análisis probabilístico, funciones de análisis de confiabilidad, flujo de potencia óptimo II (OPF I y despacho económico), análisis tecnoeconómico, estimación de estado, funciones de análisis de estabilidad (RMS), transitorios electromagnéticos (EMT) , Estabilidad de señales pequeñas (análisis de valores propios), Identificación de parámetros del sistema, Scripting y Automatización.

Número de nodos: 50

Licencia: tecla programable

Soporte limitado y actualizaciones de software

- **Licencia de tesis (PF4T)**

Esta licencia se ofrece a estudiantes individuales que trabajan en una tesis de licenciatura / maestría / doctorado no patrocinada, que no tienen acceso a una licencia de investigación (PF4R) o educativa (PF4E). No se permite el uso comercial

Funciones: definidas según el alcance del trabajo de la tesis

Número de nodos: según se requiera para la tesis

Licencia: tecla programable

La licencia es por tiempo limitado

Soporte limitado y actualizaciones de software durante el período de duración concedido de la licencia

6.1.6.1.1.4. Requerimientos del software

Para Windows

- SO: Windows 10, 8, 7, Vista
- Procesador: Dual Core 3Ghz+
- Memoria: 3 GB de RAM
- Gráficos: 512MB Video Memoria
- Almacenamiento: 500 MB de espacio disponible

Para Linux

- SO: Linux
- Procesador: Dual core 3Ghz+
- Memoria: 3 MB de RAM
- Gráficos: 512MB Video Memoria
- Almacenamiento: 500 MB de espacio disponible

6.1.6.1.2. PSS/E (Power System Simulator for Engineering)

PSS/E (Power System Simulator for Engineering) es un software para la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia en condiciones de régimen estacionario y dinámico. Una característica de PSS/E es la capacidad que posee para manejar sistemas con un gran número de elementos, como ejemplo se tiene, las actividades de flujo de potencia pueden manejar casos hasta 150 000 barras, 300 000 cargas, 26 840 barras de generación, 33 050 generadores, 300 000 líneas y 60 000 transformadores [23].

6.1.6.1.2.1. Funciones de simulación

El software PSS/E permite realizar una variedad de simulaciones, sus funciones más relevantes son:

- Flujo de potencia
- Análisis de contingencias
- Despacho económico
- Flujo óptimo de potencia (OPF)
- Análisis de fallas
- Reducción de redes
- Estudios dinámicos de estabilidad
- Estudios lineales de red, etc.

Una de las grandes cualidades de este software es su forma de trabajar automáticamente, ejecutando secuencialmente un conjunto de actividades, mediante la utilización del lenguaje de programación de PSS/E, IPLAN y desde la versión 30, también se puede utilizar el lenguaje de programación PYTHON [23].

6.1.6.1.2.2. Interfaz gráfica

PSS/E posee una interfaz gráfica muy cómoda para el usuario, tiene un aspecto similar al de otros programas que se basan en la plataforma de Windows.

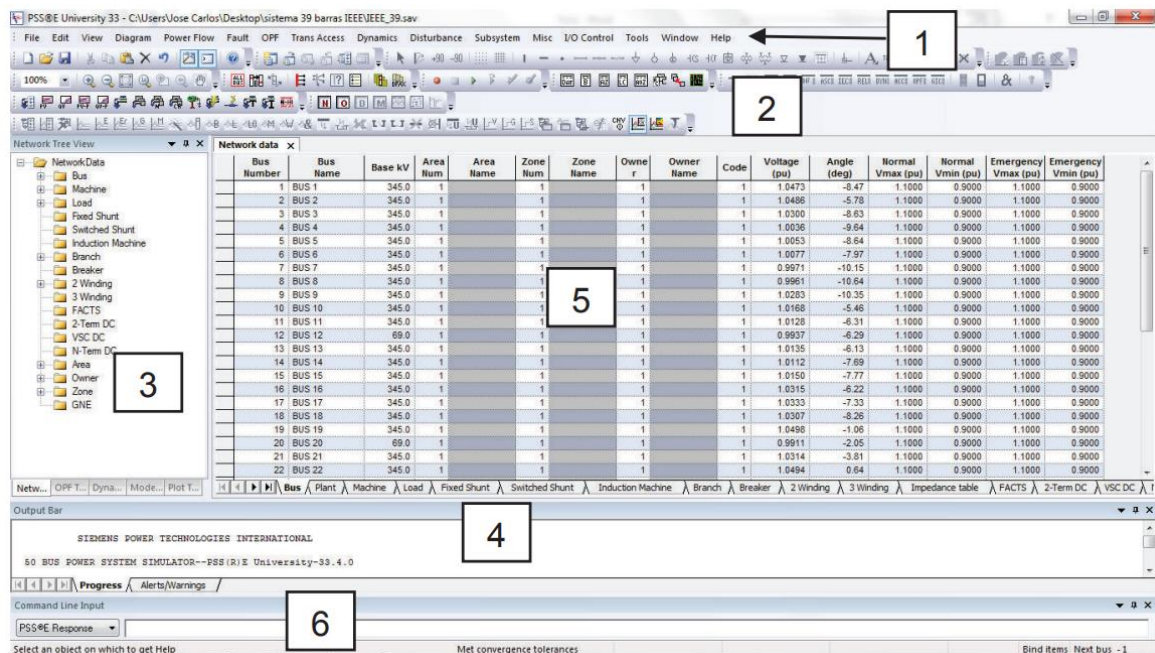


Figura 6.15: Interfaz Gráfica de PSS/E

Los componentes más importantes de la interfaz gráfica son:

1. La barra de menús
2. La barra de herramientas
3. Árbol de carpetas del caso
4. Ventana de progreso y presentación de informes
5. Spreadsheet View
6. Línea de comandos

6.1.6.1.2.3. Tipos de licencia

- Comercial

6.1.6.1.2.4. Requerimientos del software

- Pentium IV clase 2 GHz o CPU más rápida
- Se recomienda enfáticamente 2 GB o más de RAM
- Se requieren aproximadamente 700 MB de espacio libre en disco para una instalación completa de PSS®E. Asegúrese de dejar suficiente espacio para los archivos de trabajo. Deberá permitir espacio adicional en el disco para admitir el uso de la memoria virtual de Windows. Microsoft Windows® XP,

Microsoft Windows® Server 2003, Microsoft Windows 7 o Microsoft Windows® Vista

- Se requieren privilegios administrativos para instalar PSS®E, pero no para ejecutar el programa.

6.1.6.1.3. ETAP

ETAP desarrolla soluciones de ingeniería eléctrica integradas en una plataforma inteligente eléctrica digital Twin para modelar, diseñar, planificar, analizar, optimizar, controlar y automatizar sistemas de energía [24].

El análisis de simulación predictiva en línea es una poderosa herramienta analítica que permite predecir el comportamiento del sistema en respuesta a acciones y eventos del operador a través del uso de datos archivados y en tiempo real [25].

6.1.6.1.3.1. Funciones de simulación

Características principales del software de simulación:

- Simular la operación del interruptor
- Identificar problemas operativos potenciales
- Simular el arranque del motor y el cambio de carga
- Predecir el tiempo de funcionamiento de los dispositivos de protección
- Predecir la respuesta del sistema en función de las acciones del operador
- Ejecutar escenarios operativos "¿Qué pasa si?"
- Simular datos en tiempo real y archivados
- Entrenamiento y Asistencia al operador

Módulos de simulación

- Flujo de carga
- Aceleración del motor
- Cortocircuito
- Arco eléctrico
- Coordinación y selectividad del dispositivo
- Secuencia de operación
- Armonía

- Estabilidad transitoria
- Evaluación de confiabilidad

Protección y Coordinación

- Protección de transmisión y distribución
- Coordinación de Dispositivos de Protección y Selectividad
- Enclavamiento selectivo de zona - ZSI
- Protección y Coordinación Automatizadas

6.1.6.1.3.2. Interfaz gráfica

El modelado y las herramientas centrales permiten construir rápida y fácilmente diagramas unifilares de redes de CA y CC trifásicas, bifásicas y monofásicas y vistas GIS con buses y elementos ilimitados que incluyen instrumentación detallada y componentes de puesta a tierra [26].

- Diagrama de una línea y plantillas
- AutoBuild: modo de conexión automática de equipos
- Gráficos inteligentes incorporados
- Anidamiento de red
- Vistas sincronizadas de GIS y de una línea

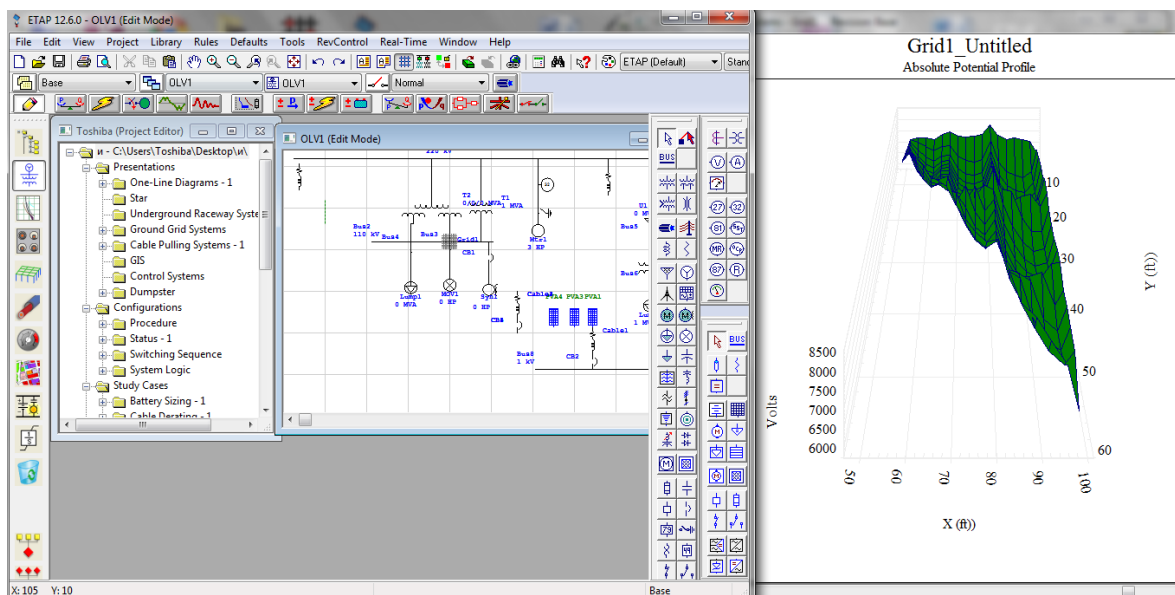


Figura 6.16: Interfaz Gráfica de ETAP

6.1.6.1.3.3. Tipo de licencia

- Licencia comercial
- ETAP Advantage
- Nuclear
- Educativo

6.1.6.1.3.4. Requerimientos del software

- Intel Core i5 or better – 2.4 GHz or better
- 8 GB RAM
- Operating System (64-bit)
- Microsoft Windows® 10 (Home Premium, Professional, Enterprise)
- Microsoft Windows® 8 & 8.1 (Standard, Professional)
- Microsoft Windows 7 (SP1) (Home Premium, Professional, Ultimate, Enterprise)
- Microsoft® Server 2016 (Standard), Server 2019 (Standard)
- Microsoft Server 2012 & 2012 R2 (Standard)

6.1.6.1.4. Power World

Power World es un software de análisis y simulación de sistemas de energía eléctrica que permite realizar estudios en régimen permanente. Está estructurado en una serie de módulos interrelacionados entre sí a través del módulo principal de cálculo de flujo de cargas [27].

En definitiva, el campo de aplicación de PowerWorld es el de los estudios en régimen permanente, permitiendo hacer análisis técnicos (límites de tensión, repartos de carga, etc.) y económicos (costes de generación, análisis económico de transacciones entre agentes del mercado, etc.) [27].

6.1.6.1.4.1. Funciones de simulación

El programa de simulación por computadora de sistemas de potencia PowerWorld permite realizar distintos tipos de análisis, entre los cuales se encuentran:

- Flujos de carga
- Flujo de potencia óptimo

- Fallas por cortocircuito
- Estabilidad
- Despacho económico, entre otros

6.1.6.1.4.2. Interfaz gráfica

Trabaja en un ambiente gráfico e interactivo con el usuario y está destinado a labores de ingeniería, personal técnico y para fines académicos en el análisis de sistemas de potencia. El programa está dirigido principalmente a sistemas de potencia interconectados, ya que permite trabajar por áreas y zonas. Está estructurado en una serie de módulos interrelacionados entre sí a través del módulo principal de cálculo de cargas.

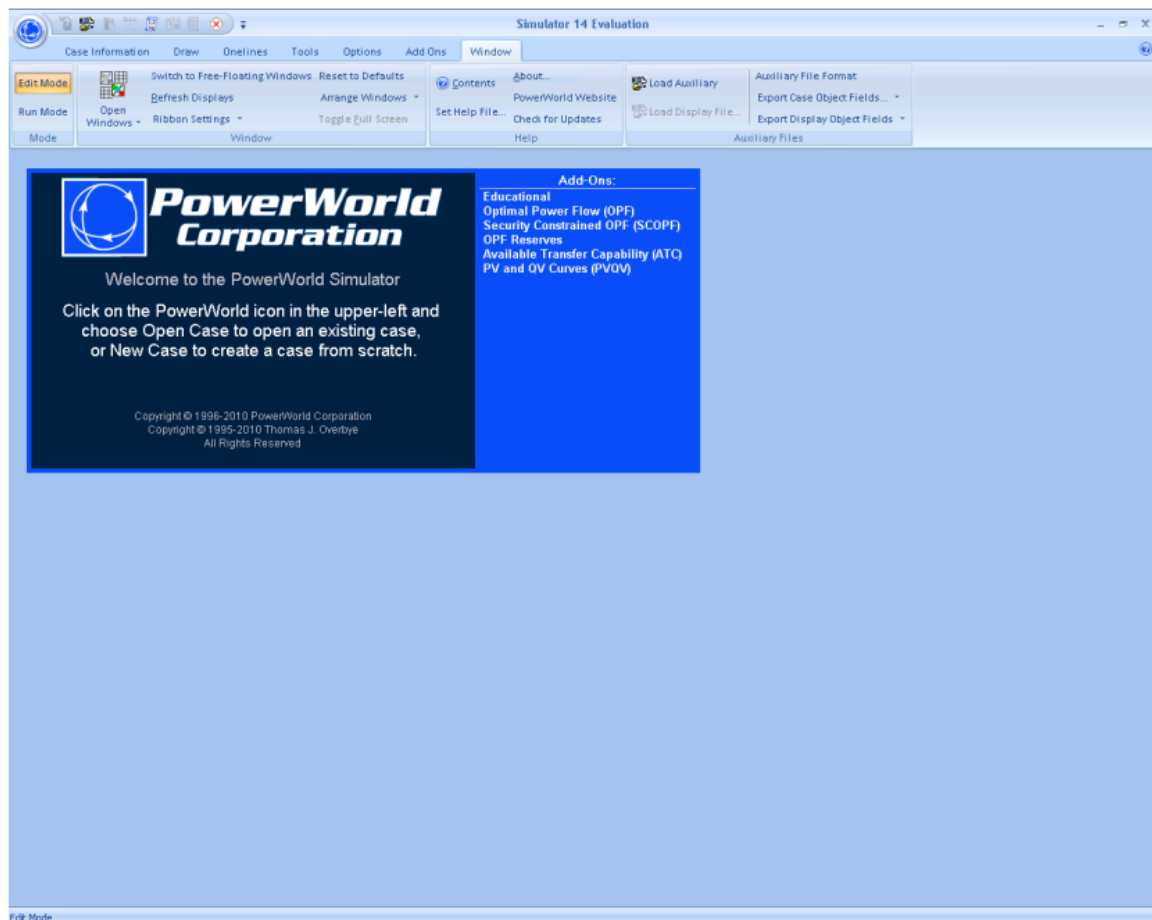


Figura 6.17: Interfaz Gráfica de Power World

6.1.6.1.4.3. Tipo de licencia

- Comercial

- Versión especial para estudiantes (Compra a través de la institución)

6.1.6.1.4.4. Requerimientos del software

Para la ejecución del simulador PowerWorld se necesita cualquiera de las siguientes plataformas operativas: Windows 2000, NT, XP y Vista. Aunque se desconocen los requerimientos de hardware ideales para la operación eficiente del programa, este se ha probado satisfactoriamente con fines educativos en equipos con las siguientes especificaciones:

- Procesador Pentium 4-1.70 GHz.
- 512 MB de memoria RAM.
- Disco Duro de 80 GB.
- Monitor Plug and Play, Tarjeta de video (1280 x 1024).
- Sistema operativo Windows XP.

6.1.6.1.5. MATLAB

Matlab es una herramienta poderosa de programación autentica, orientada a cálculos numéricos con vectores y matrices incluyendo escalares y números complejos, cadenas de caracteres y estructuras formales complicadas, además, es capaz de trabajar con gráficos en dos y tres dimensiones [27].

6.1.6.1.5.1. Funciones de simulación

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas o discretas. Esto significa que puede modelar sistemas continuos y discretos en el tiempo y sistemas híbridos lineales, no lineales y multifrecuencia [27].

Matlab posee librerías disponibles en Simulink para representar generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas de los modelos de un sistema de potencia [28].

6.1.6.1.5.2. Tipo de licencia

- MATLAB para uso comercial
- MATLAB para estudiantes
- Uso universitario

- Uso en comunidad y colegios técnicos
- Uso en educación primaria y secundaria
- Uso para startup
- Uso doméstico

6.1.6.1.5.3. Interfaz gráfica

Posee una interfaz gráfica de usuario (GUI) para definir y analizar modelos con librerías y diagramas de bloques fáciles de utilizar, que le dan una clara ventaja sobre la mayoría de simuladores. Simulink es integral ya que es posible simular sus modelos desde las líneas de comando de Matlab, verificar los resultados de simulación en los bloques del modelo mientras se está ejecutando, y transferirlos a la consola de Matlab para procesarlos [27].

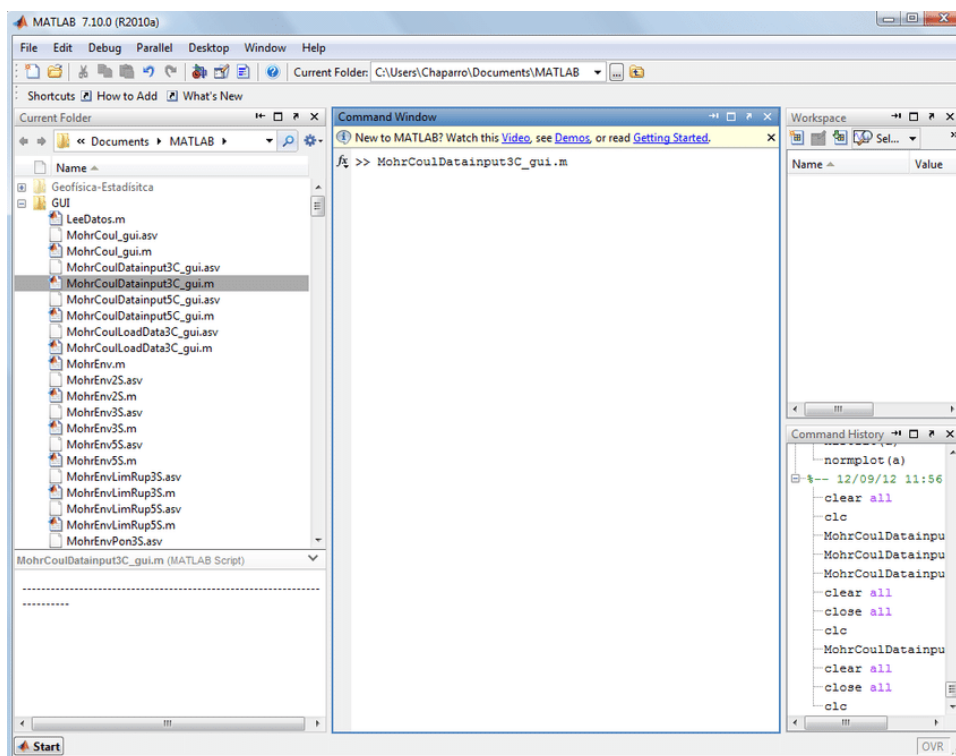


Figura 6.18: Interfaz Gráfica de Matlab

6.1.6.1.5.4. Requerimientos del software

- Procesador: Intel o AMD x86-64 con soporte de instrucciones AVX2.
- Disco: 2 GB solo para MATLAB, 4-6 GB para una instalación típica.
- RAM: 1GB mínimo, 4 GB recomendado.

- Tarjeta gráfica: Soporte para OpenGL 3.3 recomendado con 1 GB en GPU.

6.1.6.1.6. EMTP-ATP

El ATP (Alternative Transients Program) es un programa para simulación de sistemas eléctricos enfocado a la simulación de transitorios electromagnéticos y electromecánicos en sistemas polifásicos. Fue desarrollado a partir del EMTP [29].

6.1.6.1.6.1. Funciones de simulación

A continuación, se listan las aplicaciones del ATP

- Estudios de sobrevoltajes por rayo
- Transitorios de maniobra y fallas
- Estudios de sobretensiones estadísticos y determinísticos
- Transitorios de alta frecuencia en GIS
- Modelado de máquinas
- Estabilidad transitoria, arranque de motores
- Oscilaciones torsionales
- Maniobra de transformadores, reactores y bancos de compensación
- Ferroresonancia
- Aplicaciones de electrónica de potencia
- Arco eléctrico en interruptores, chopeado de corriente
- Dispositivos FACTS, STATCOM, SVC, UPFC, TCSC
- Análisis armónico y resonancia de red
- Pruebas de relés de protección

6.1.6.1.6.2. Tipo de licencia

El ATP no es de dominio público, sin embargo, está disponible para cualquier persona que acepte voluntariamente no participar en la comercialización. En general se prefieren los licenciamientos para organizaciones [29].

6.1.6.1.6.3. Interfaz gráfica

El ATPDraw es en esencia una Interfaz gráfica que interpreta los gráficos correspondientes a modelos y conexiones y a partir de éstos codifica el archivo plano que lee el ATP [29].

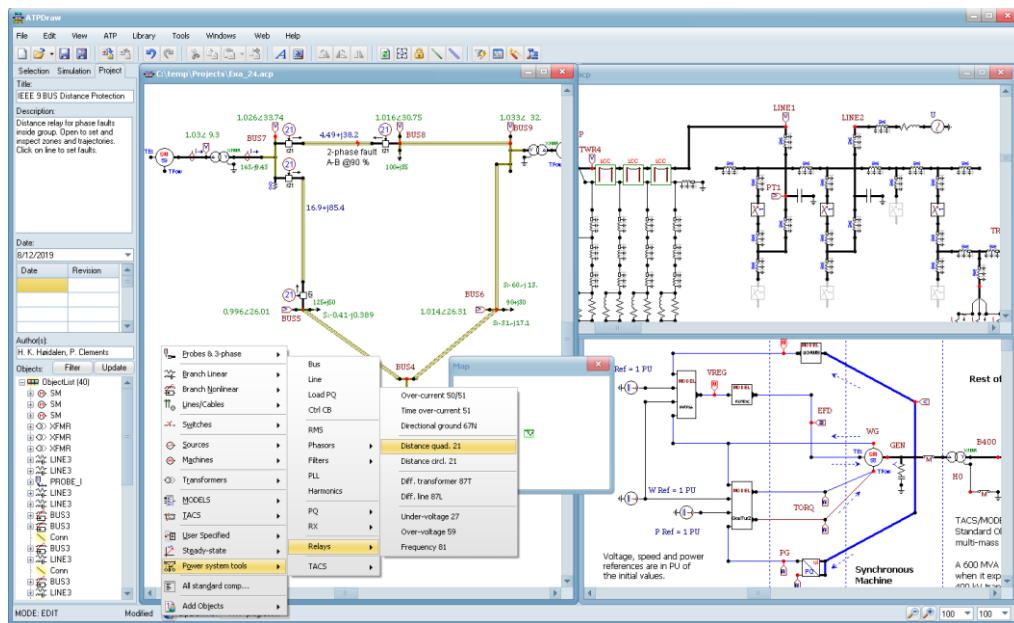


Figura 6.19: Interfaz Gráfica de ATP

La interfaz gráfica facilita el trabajo con el ATP dado que esta se encarga de generar el archivo plano en el formato rígido que contiene la descripción de la red y la configuración de la simulación [29].

6.1.6.1.6.4. Requerimientos del software

- ATP® se puede instalar desde Windows 98.
- Requisitos sugeridos: no requiere de grandes recursos de hardware para su instalación.

6.1.6.2. Tabla comparativa de alternativas de software de simulación de sistemas de potencia orientada a protecciones

La siguiente tabla muestra a modo de resumen la lista de software de simulación descritos en apartados anteriores. Existen muchos simuladores de los cuales se han seleccionado aquellos que poseen funciones relacionadas a sistemas eléctricos de potencia.

Para la ponderación se ha considerado que por la naturaleza del proyecto, la orientación hacia simulación de sistemas de protecciones tendría mayor peso a la hora de la selección. Del mismo modo, es deseable que el software posea una versión especial para estudiantes, lo que abarataría su adquisición.

Criterio	Simulación de protecciones	Licencia educativa/estudiante	Interfaz intuitivo	Requerimientos Hardware accesible	TOTAL
Ponderación	50 %	30%	10%	10%	100%
DIGSILENT	0,5	0,3	0,1	0,1	1
PSS/E	0,5	0	0,1	0,1	0,7
ETAP	0,5	0	0,1	0,1	0,7
POWER WORLD	0,5	0,3*	0	0,1	0,8*
MATLAB	0,5	0	0	0,1	0,6
ATP	0,5	0	0,1	0,1	0,7

Tabla 6.7: Comparación de software de simulación de sistemas de potencia

Fuente: Elaboración propia

* Posee plan especial para instituciones educativas

Como resultado de la comparación de las alternativas de software de simulación y teniendo en cuenta la ponderación de los criterios antes mencionados, se selecciona el software de simulación DigSilent Power Factory con una puntuación total de 1 cumpliendo con el 100% de los criterios para ser utilizado en el laboratorio de prácticas de sistemas de protecciones de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú.

6.1.7. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EN EL LABORATORIO PARA LA PRÁCTICA DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS

A modo de resumen, en este apartado se presentan los elementos seleccionados para la bancada de práctica del laboratorio. Se detallan sus características y requerimientos para facilitar el diseño de panel donde irán montados los equipos de práctica.

La función de protección seleccionada para el diseño del módulo didáctico del laboratorio de protecciones en sistemas de potencia corresponde a la protección de línea de transmisión a través de un relé de distancia (ANSI 21).

6.1.7.1. Dispositivo de protección

Este dispositivo corresponde al ABB REL670 que trata de un relé multifunción programable, con presentación $\frac{3}{4}$ 19" con un TRM incorporado. Con este único TRM ya es suficiente para su implementación como protección de distancia de línea de transmisión en 220 kV, que es el objetivo del laboratorio proyectado. La figura muestra una vista frontal del dispositivo.

El relé ABB REL670 está optimizado para aplicaciones de transmisión y brinda protección, funciones de monitoreo y control con flexibilidad y rendimiento optimizado para líneas aéreas y cables de transmisión. Además, los relés ABB REL670 poseen funciones para proteger y controlar varios objetos, por ejemplo, una combinación de una línea y un transformador con un solo dispositivo.

Las mediciones y la configuración de las seis zonas con seis grupos de configuración se hacen completamente independientes. Las funciones de protección de distancia y falla a tierra pueden comunicarse con el extremo remoto en cualquier esquema de comunicación. Ofrece la funcionalidad de enclavamiento y control total necesaria para el control de aparatos en una subestación [30].

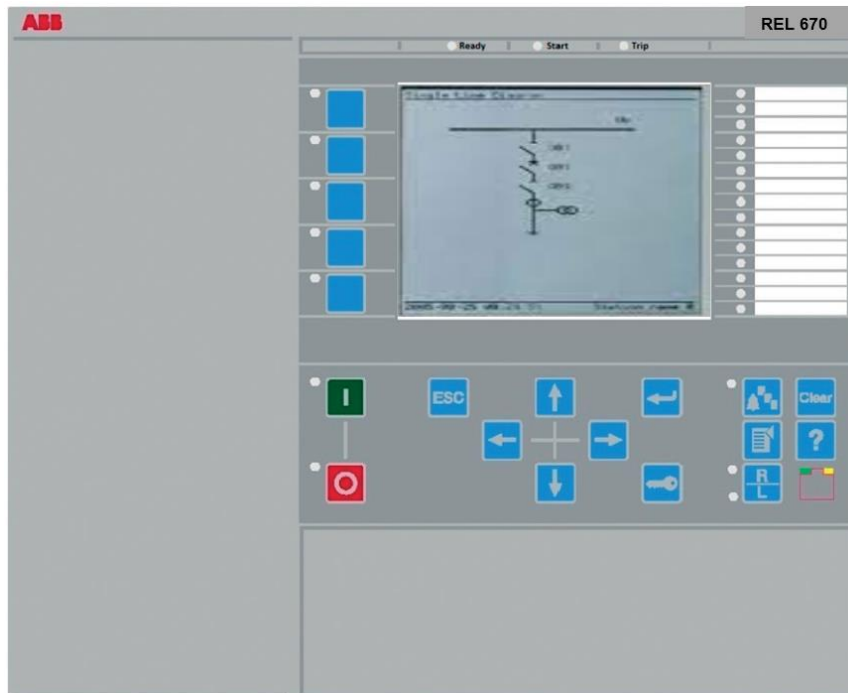


Figura 6.20: Vista frontal del dispositivo de protección REL 670

Posee un HMI local que será muy útil para las practicas que involucren control de bahía al igual que configuración y parametrización del equipo. La Figura 6.21 muestra la vista trasera del dispositivo, se pueden apreciar sus bornes de conexión que son detallados más adelante.



Figura 6.21: Vista trasera de dispositivo de protección REL 670

6.1.7.2. Módulos de conexión

Los módulos de conexión son utilizados para la obtención de datos técnicos de nivel de bahía, también denominados de campo. Estos módulos también se aprecian en la Figura 6.21.

Están divididos en diferentes bloques numerados, compuesto por alguno de los siguientes:

- Módulo de alimentación (PSM)
- Módulo de entradas binarias (BIM)
- Módulo de salidas binarias (BOM)
- Módulo de salidas binarias estáticas (SOM)
- Módulo Ethernet óptico (OEM)
- Módulo SPA/LON/IEC (SLM)
- Módulo de comunicación de datos de línea (LDCM)
- Módulo de transformador (TRM)

La Figura 6.22 ilustra la posición de cada módulo en el equipo. La cantidad de modulo varía según el propósito del proyecto y el tamaño del dispositivo.

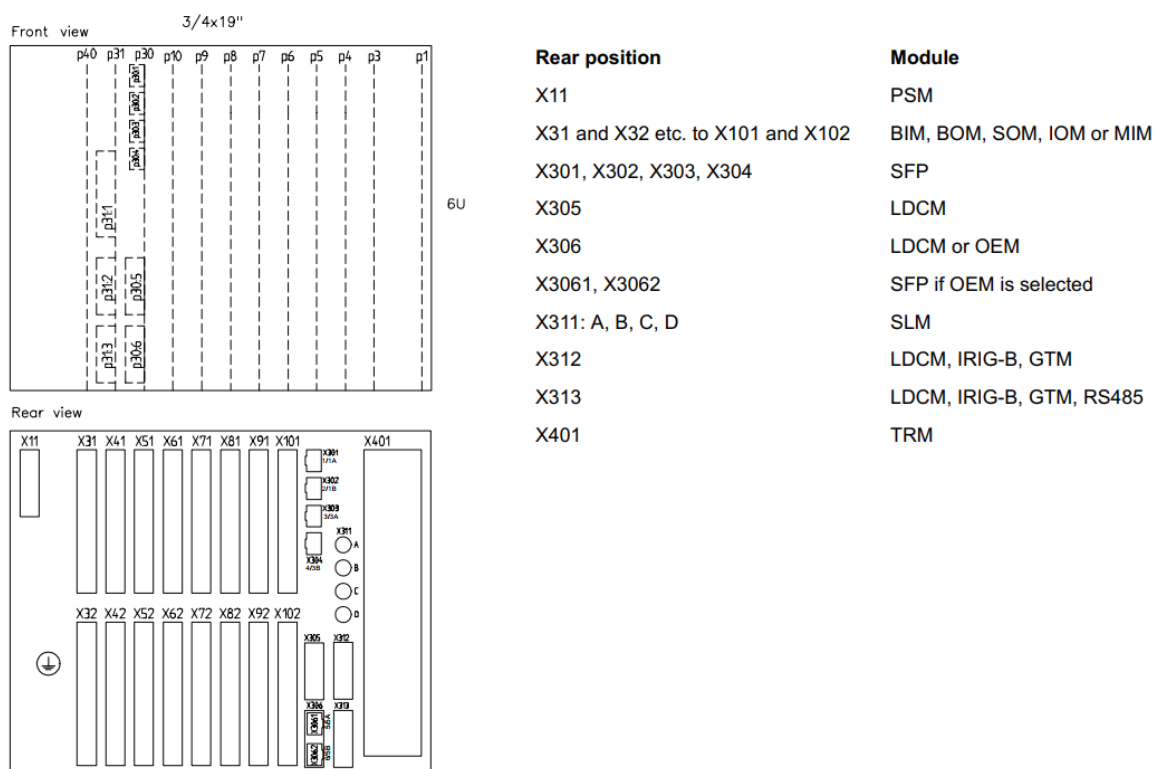


Figura 6.22: Ubicación de los módulos del IED ABB REL670. Fuente: Manual de instalación

6.1.7.2.1. Funciones del dispositivo programable ABB REL670

Dentro de las funciones disponibles en el IED se encuentran los siguientes:

- Principales funciones de protección
- Funciones de protección de respaldo
- Funciones de control y monitorización
- Comunicación
- Funciones básicas del IED

6.1.7.2.2. Funciones de protección del ABB REL670

El dispositivo posee numerosas funciones de protección aplicables a líneas, además de la protección de distancia también denominada de impedancia, los cuales se citan a continuación:

- Protección diferencial

- Protección de impedancia
- Protección de corriente
- Protección de voltaje
- Protección de frecuencia
- Protección multipropósito

6.1.7.2.3. Interface HMI local

La LHMI del IED Incluye los siguientes elementos:

- Pantalla gráfica capaz de mostrar un diagrama unifilar
- definido por el usuario y proporcionar una interfaz para el control de la aparamenta.
- Botones de navegación y cinco botones de órdenes definidos por el usuario para accesos directos al árbol de la HMI u órdenes sencillas.
- 15 LED tricolores definidos por el usuario.
- Puerto de comunicación para el PCM600.

La LHMI se utiliza para ajustar, monitorizar y controlar.

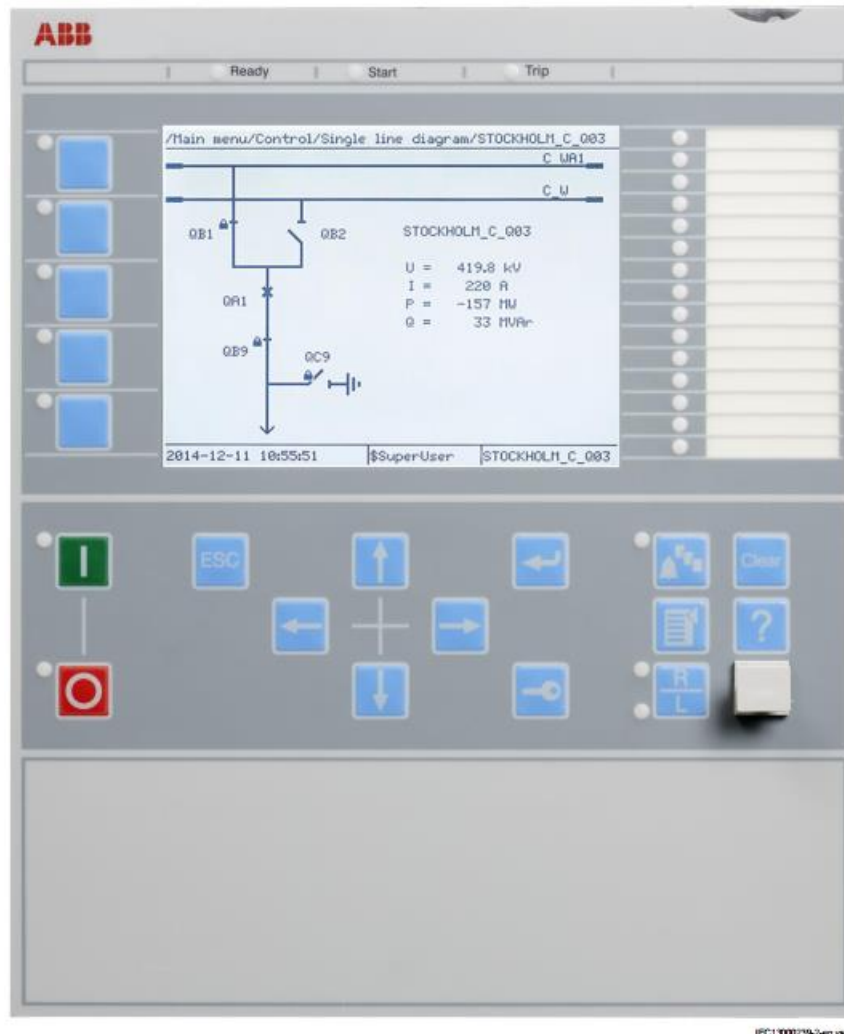


Figura 6.23: Interfaz HMI local

6.1.7.2.3.1. Pantalla

La LHMI incluye una pantalla gráfica monocromática con una resolución de 320 x 240 píxeles. El tamaño de los caracteres puede variar. La cantidad de caracteres y filas que entran en la vista depende del tamaño de los caracteres y la vista que se muestran. La pantalla se divide en cuatro áreas básicas que son las siguientes:

1. Ruta
2. Contenido
3. Estado
4. Barra de desplazamiento (aparece cuando es necesario)

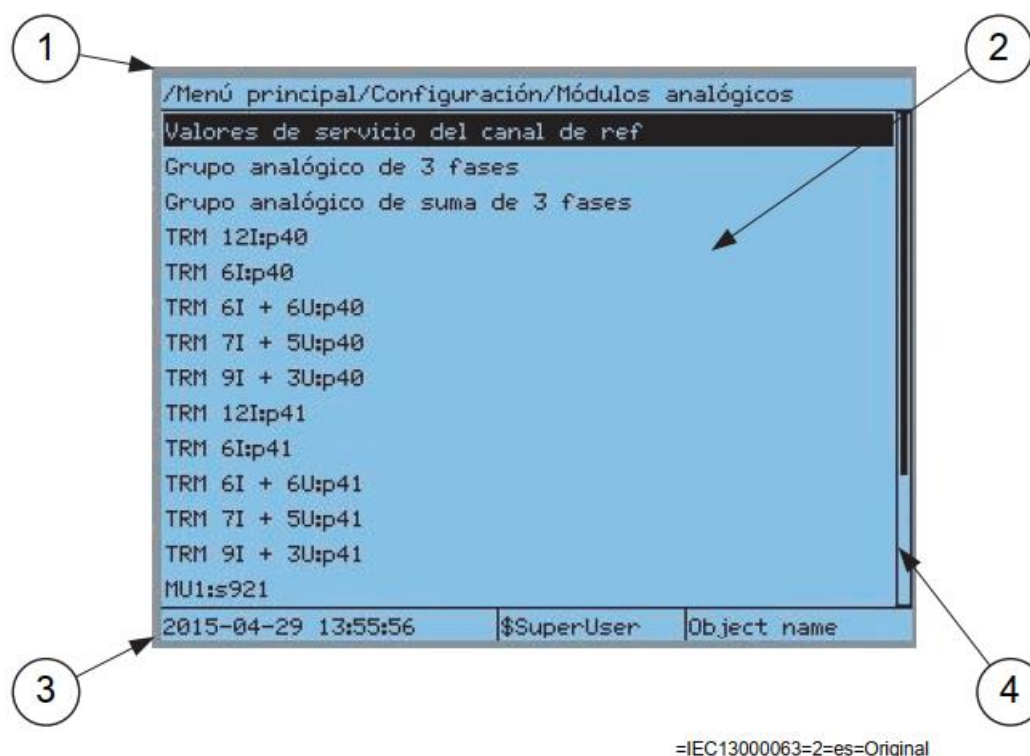


Figura 6.24: Pantalla del HMI local

6.1.7.2.3.2. Leds

La LHMI dispone de tres LED de estado de protección en la parte superior de la pantalla: Ready (Listo), Start (Arranque) y Trip (Disparo).

También hay 15 LED de alarma programables en la parte frontal de la LHMI. Cada LED indica tres estados con los colores: verde, amarillo y rojo. Los textos de alarma relacionados con cada LED de tres colores se dividen en tres páginas.

6.1.7.2.3.3. Teclado

El teclado de la LHMI tiene pulsadores que se utilizan para navegar en las diferentes vistas o menús. Los pulsadores también se utilizan para reconocer alarmas, reponer indicaciones, brindar ayuda y alternar entre los modos de control local y remoto.

El teclado también tiene pulsadores programables que se pueden configurar ya sea como accesos directos del menú o botones de control.

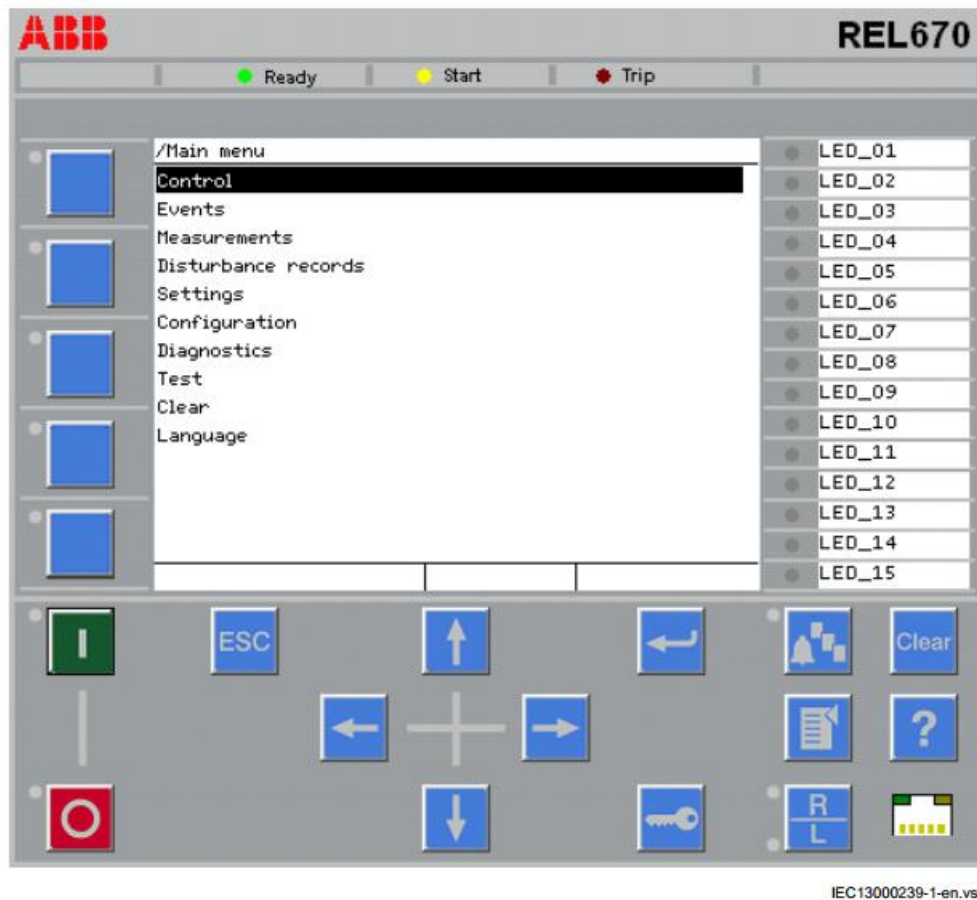


Figura 6.25: Teclados del HMI local

6.1.7.2.4. Interfaz de programación

6.1.7.2.4.1. Puerto de comunicación

Esta interfaz consiste en un puerto RJ-45 que es utilizada para la configuración, prueba y parametrización del equipo.

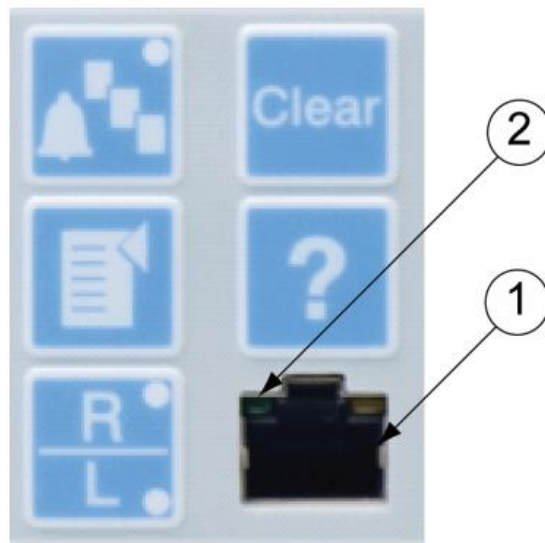


Figure 15: RJ-45 communication port

- 1 IED service port with RJ-45 connector
- 2 Green indicator LED (lit when the cable is successfully connected)

Figura 6.26: Puerto de comunicación

6.1.7.2.4.2. Software de programación

IED Manager de protección y control PCM600 ofrece toda la funcionalidad necesaria para trabajar en todas las etapas del ciclo de vida del IED [31].

- Planificación
- Ingeniería
- Puesta en servicio
- Operación y manejo de perturbaciones
- Análisis funcional

6.1.7.2.5. Protocolos de comunicación del ABB REL670

El relé está provisto de una interfaz de comunicación que le permite conectarse a uno o varios sistemas de nivel de subestación, ya sea en el bus de Automatización de Subestación (SA) o en el bus de Supervisión de Subestación (SM).

Protocolos de comunicación disponibles:

- Protocolo de comunicación IEC 61850-8-1
- Protocolo de comunicación IEC 61850-9-2LE
- Protocolo de comunicación LON
- Protocolo de comunicación SPA o IEC 60870-5-103
- Protocolo de comunicación DNP3.0

Un dispositivo puede combinar varios protocolos [31].

6.1.7.2.6. Descripción del Hardware

Dependiendo de la aplicación de ingeniería del relé, pueden requerirse de otros módulos que el mismo posee, pero por cuestiones prácticas no se presentan en este apartado.

Los módulos más importantes para los requerimientos del presente proyecto se describen a continuación.

6.1.7.2.6.1. Módulo de alimentación (PSM)

El módulo de alimentación se utiliza para proporcionar las tensiones internas adecuadas y un aislamiento completo entre el terminal y el sistema de alimentación. Se puede utilizar una salida de alarma de fallos interna.

El diagrama de conexión del módulo de alimentación se muestra en la figura siguiente.

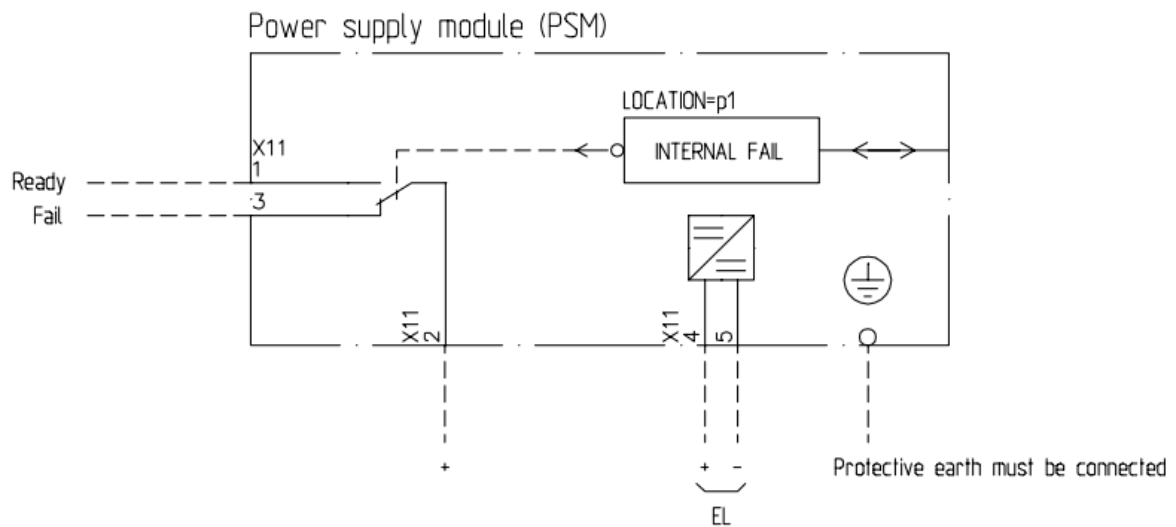


Figura 6.27: Módulo de alimentación

Tensión de alimentación:

- 90/250 VDC
- 24/60 VDC

Quantity	Rated value	Nominal range
Auxiliary DC voltage, EL (input)	EL = (24-60) V EL = (90-250) V	EL \pm 20% EL \pm 20%
Power consumption	50 W typically	-
Auxiliary DC power in-rush	< 10 A during 0.1 s	-
Supply interruption bridging time	< 50 ms	-

Figura 6.28: Características de la fuente de alimentación

6.1.7.2.6.2. Módulo de transformadores de entrada (TRM)

El módulo de entrada de transformador se utiliza para separar galvánicamente y transformar las corrientes y tensiones secundarias generadas por los transformadores de medida. El módulo tiene doce entradas, en distintas combinaciones de entradas de corriente y tensión. Se pueden pedir conectores alternativos, de tipo anillo o de tipo compresión.

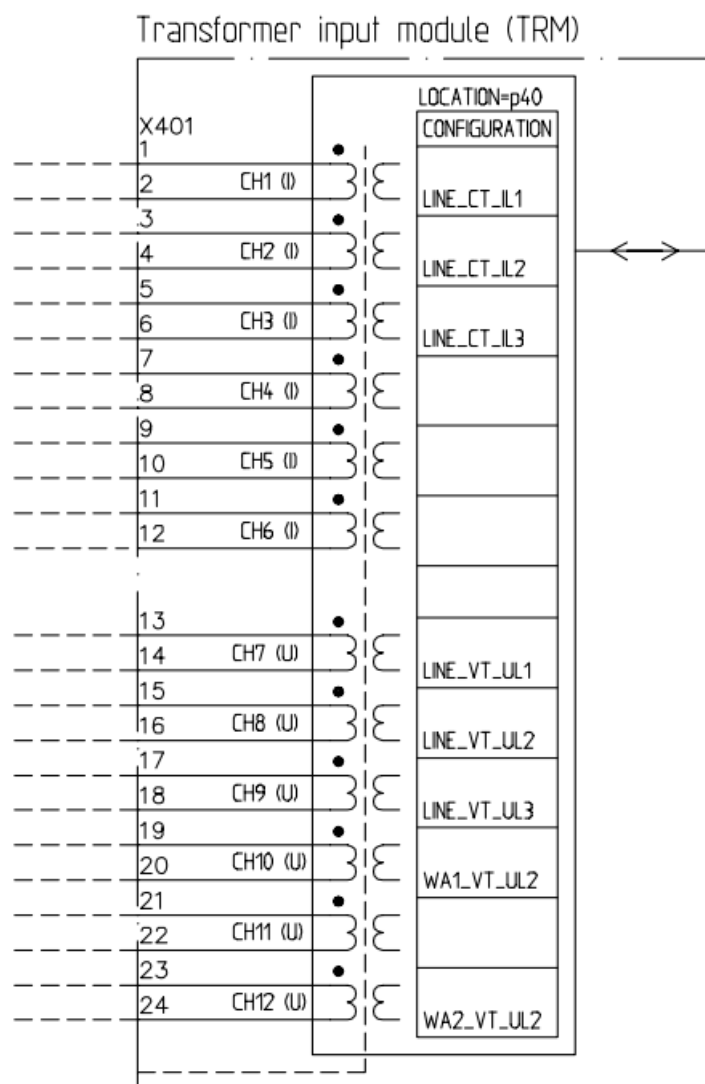


Figura 6.29: Módulo TRM

6.1.7.2.6.3. Módulo de entradas binarias BIM

El módulo de entradas binarias tiene 16 entradas aisladas ópticamente y está disponible en dos versiones, una estándar y una con capacidades mejoradas de recuento de pulsos en las entradas para utilizarse con la función contador de pulsos. Las entradas binarias se pueden programar libremente y pueden utilizarse para la entrada de señales lógicas en cualquier función. También se pueden incluir en las funciones registro de perturbaciones y registro de eventos. Esto permite una amplia monitorización y evaluación del funcionamiento del IED y de todos los circuitos eléctricos asociados.

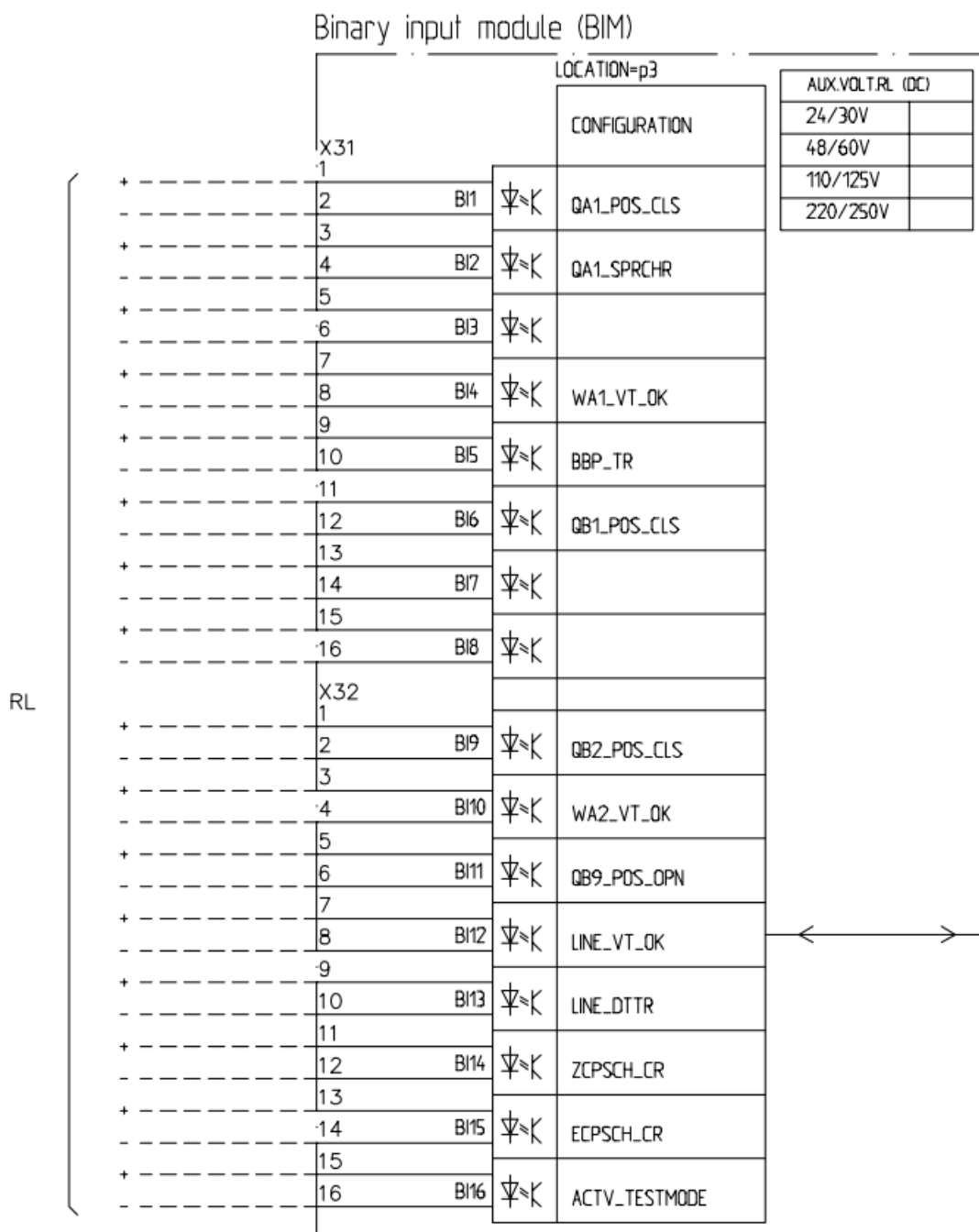


Figura 6.30: Módulo BIM

6.1.7.2.6.4. Módulo de salidas binarias BOM

El módulo de salidas binarias tiene 24 relés de salida independientes y se utiliza para salidas de disparo o para cualquier señalización.

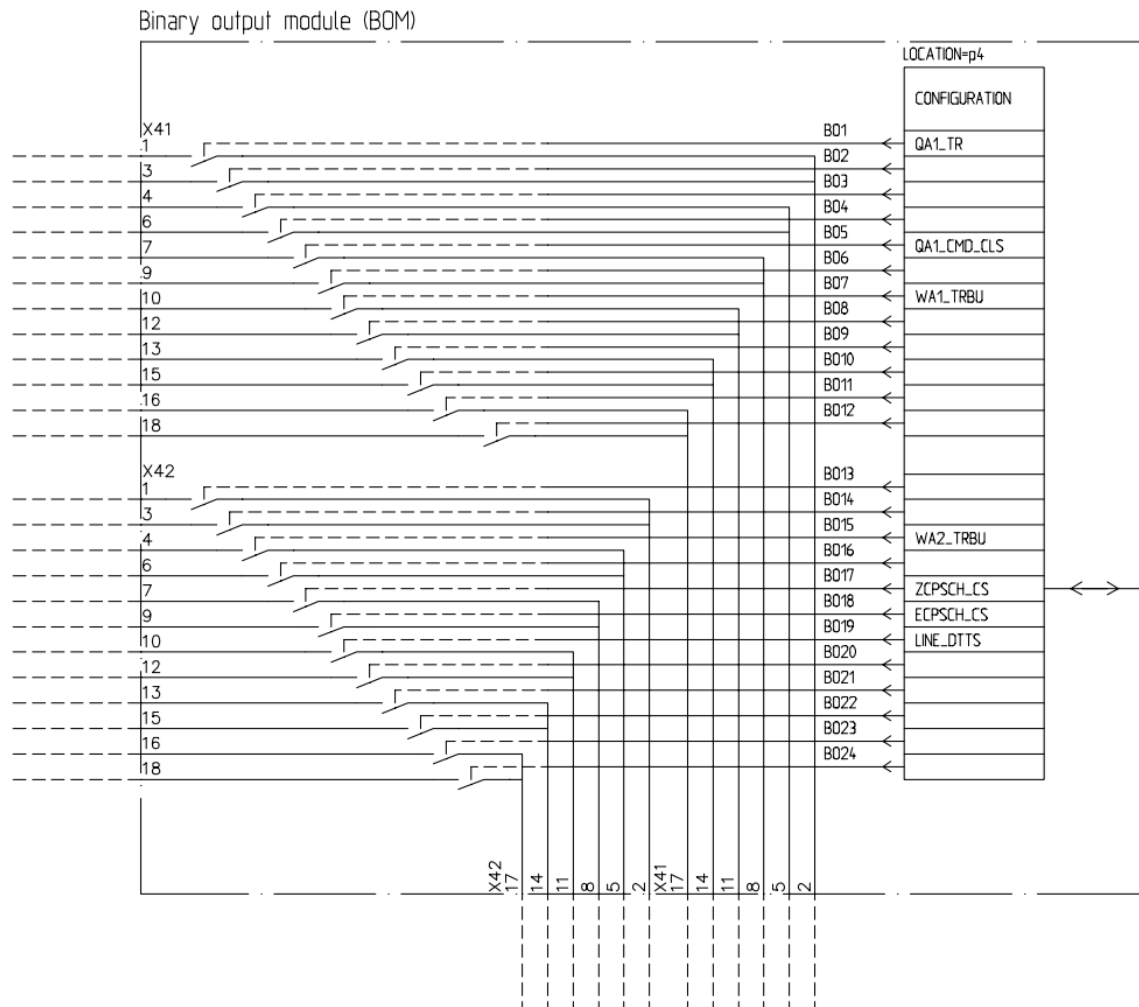


Figura 6.31: Módulo BOM

6.1.7.2.7. Pasos para la programación del ABB REL670

6.1.7.2.7.1. Consideraciones generales

El dispositivo en estudio posee una gran cantidad de documentaciones como por ejemplo diagramas de conexión según la aplicación, manual de instalación, manual de ingeniería, manual técnico, manuales de protocolos de comunicación, manuales de operación entre otros. Por lo tanto, es necesario revisar cada una de las documentaciones para la aplicación exitosa del relé seleccionado. En la figura siguiente se muestran las documentaciones de un ABB REL670, estas documentaciones pueden ser revisadas desde el software PCM600 del mismo fabricante (Figura 6.32).

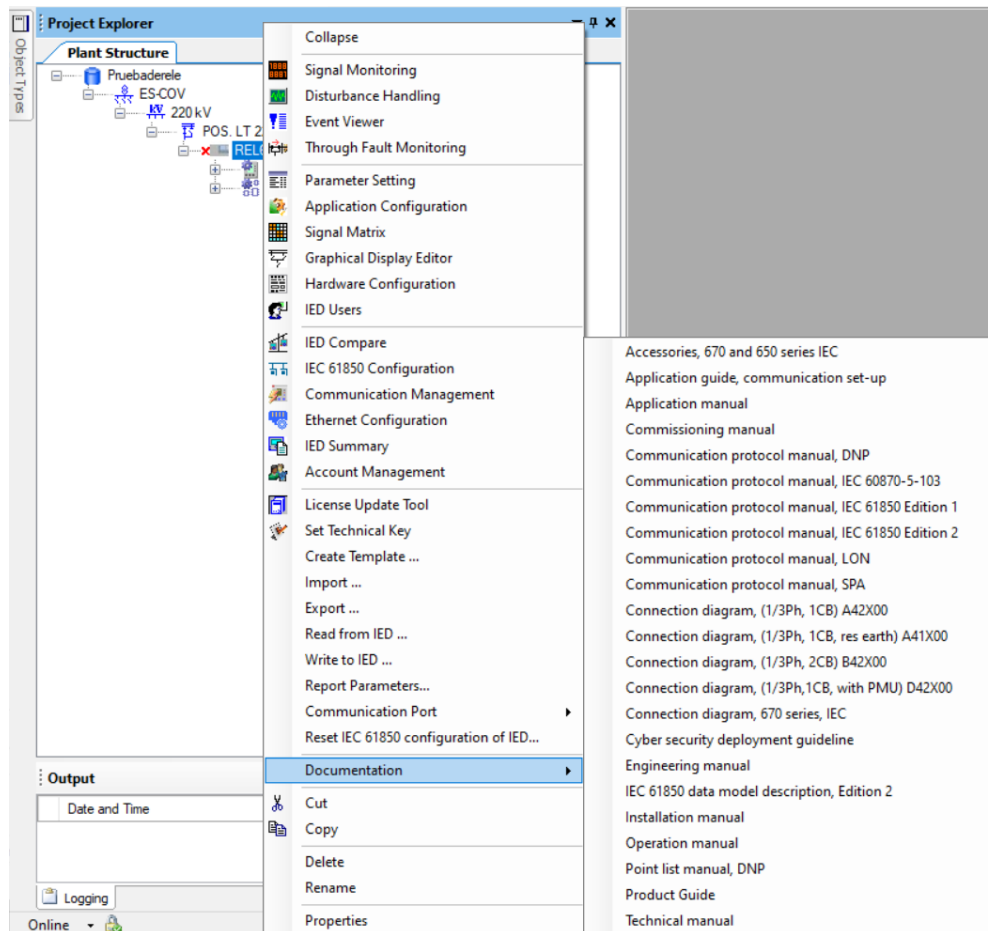


Figura 6.32: Documentaciones del relé ABB REL670

6.1.7.2.7.2. Identificación de los módulos y ranuras del IED

Existen varias versiones de dispositivo, teniendo en cuenta el modelo. La Figura 6.33 muestra la designación de los módulos para el IED REL670 caja $\frac{3}{4}$ " x 19" con un módulo de transformador (TRM), se debe tener en cuenta que también existen versiones de tamaño y cantidad de módulos diferentes. La selección de uno u otro modelo y versión del dispositivo dependerá de la ingeniería de aplicación del mismo.

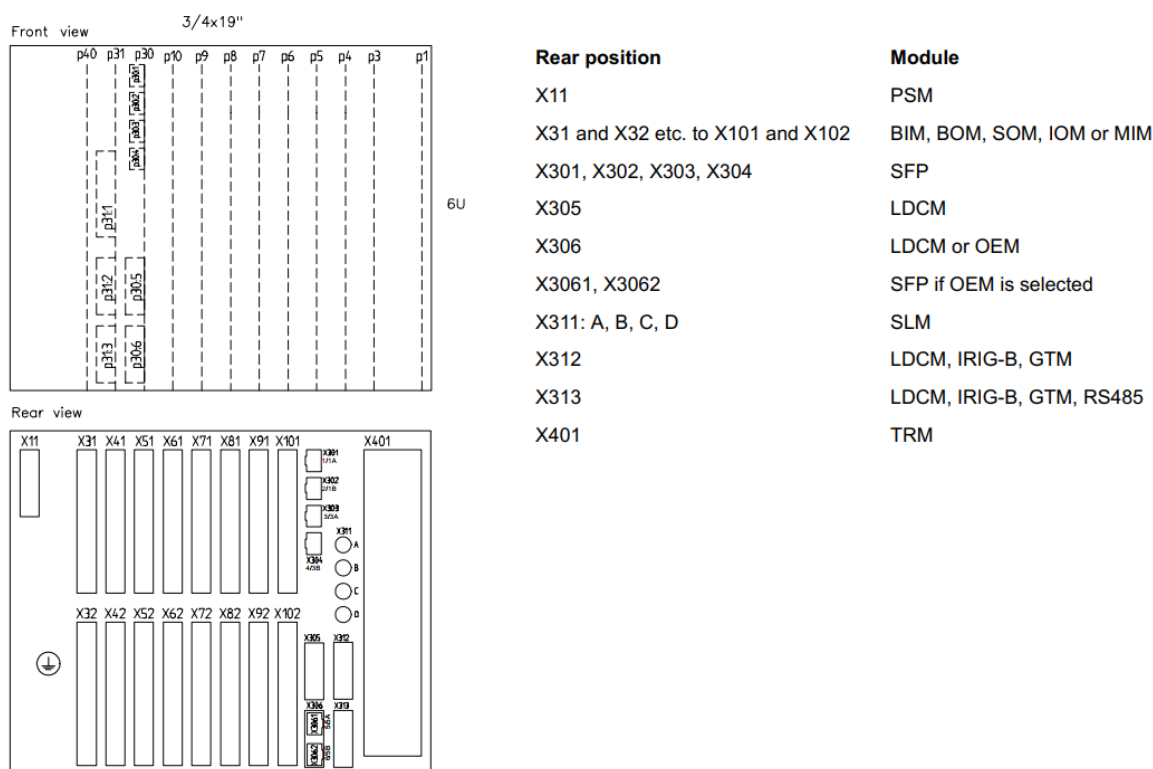


Figura 6.33: Ubicación de los módulos del IED ABB REL670. Fuente: Manual de instalación

6.1.7.2.7.3. Ingeniería de procesos del IED

Este apartado consiste en una serie de actividades relacionadas a la aplicación de los conocimientos del campo de las subestaciones eléctricas y de sus elementos para la puesta en funcionamiento del IED con una aplicación específica.

El diagrama de la figura muestra el flujo de trabajo en la ingeniería de proceso de un IED. Cada uno de los pasos se describen a continuación.

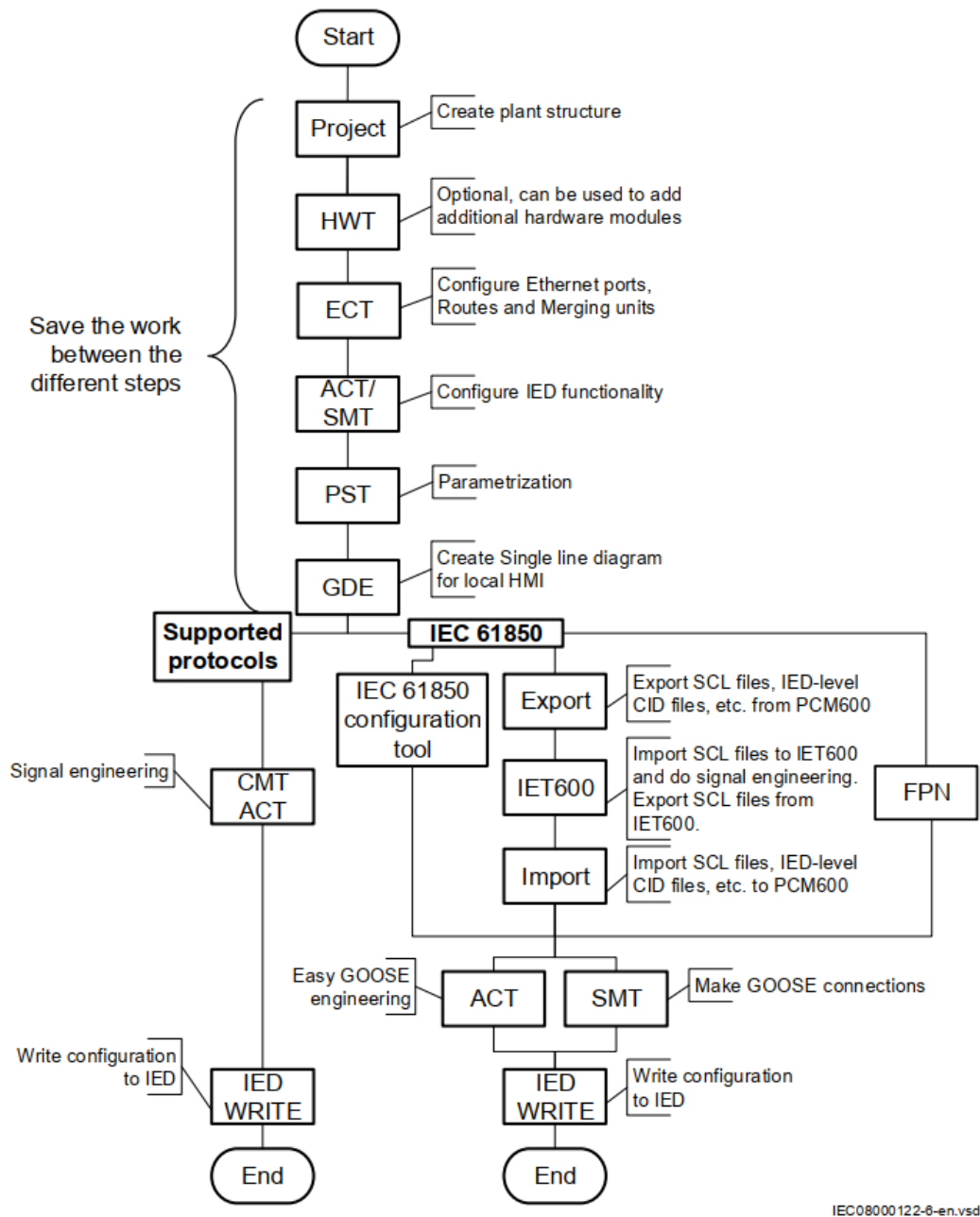


Figura 6.34: Diagrama de flujo de la ingeniería de proceso del IED

En Project: se crea un nuevo proyecto y se define la estructura de la planta acorde a la estructura de la subestación como se muestra en la figura.

Herramienta de Hardware – Hardware Tool (HWT): es opcional y puede ser utilizado para agregar diferentes módulos adicionales al IED.

Configuración de Ethernet – Ethernet Configuration Tool (ECT): configura puntos de acceso, rutas y Merjin Units.

Herramienta de configuración de aplicación y matriz de señales – Application Configuration Tool and Signal Matrix Tool (ACT/SMT), en este paso se configura las funcionalidades del IED, la programación lógica.

Herramienta de parametrización – Parameter Setting Tool (PST): permite parametrizar los módulos según la configuración lógica del IED.

Editor gráfico de pantalla – Graphic Display Editor (GDE): permite crear un diagrama unifilar que se mostrará en la pantalla del IED, se pueden incluir medidas y asociar elementos dinámicos a funciones creadas en el ACT por ejemplo un objeto interruptor a la función de interruptor.

Ingeniería HMI local – Local Human Machine Interface (LHMI): en este paso se deben incluir y diseñar los bloques de funciones para grupos de elementos LHMI con ACT y SMT, definir el comportamiento del LED con PST, configurar los LED con ACT y SMT.

Ingeniería de protocolo de comunicación, los pasos de ingeniería dependen del protocolo. La herramienta de configuración IEC 61850 permite configurar el IED según la norma IEC 61850. Para otros protocolos se deben consultar los manuales de ingeniería y de aplicación de ABB [31].

Las herramientas mencionadas se pueden observar haciendo click derecho sobre el IED como se muestra en la siguiente figura.

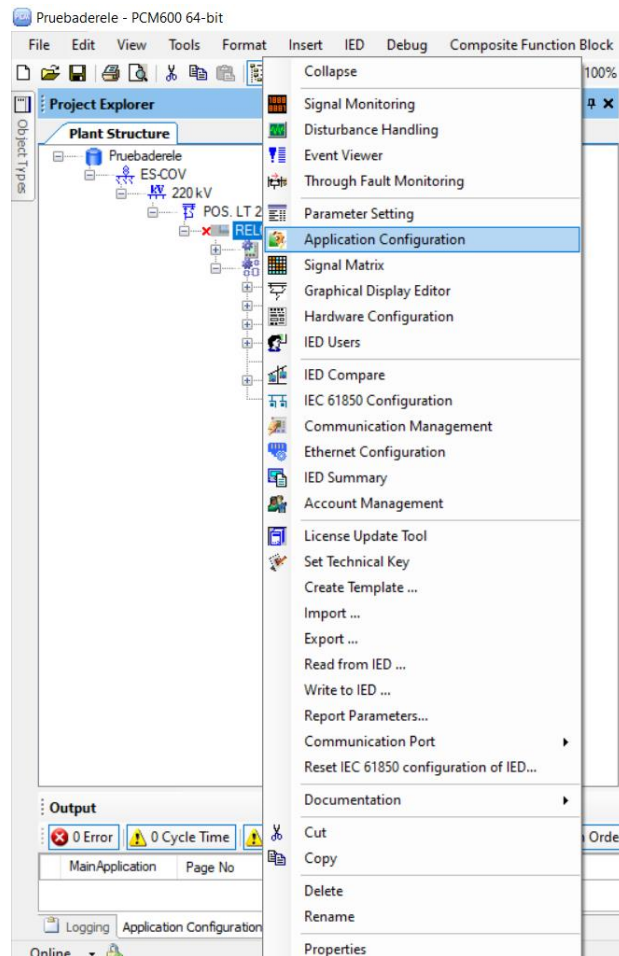


Figura 6.35: Herramientas del PCM600

6.1.7.2.7.4. Creación del proyecto en PCM600

Antes de crear un nuevo proyecto en PCM600 es necesario haber seleccionado previamente un IED específico y descargar el paquete de conectividad y los archivos de preconfiguración (ICD) para el mismo. En este proyecto se seleccionó el IED ABB REL670 y se descargaron los paquetes necesarios con el software del propio fabricante incluido en PCM600 y denominado Update Manager como se muestra en la figura.

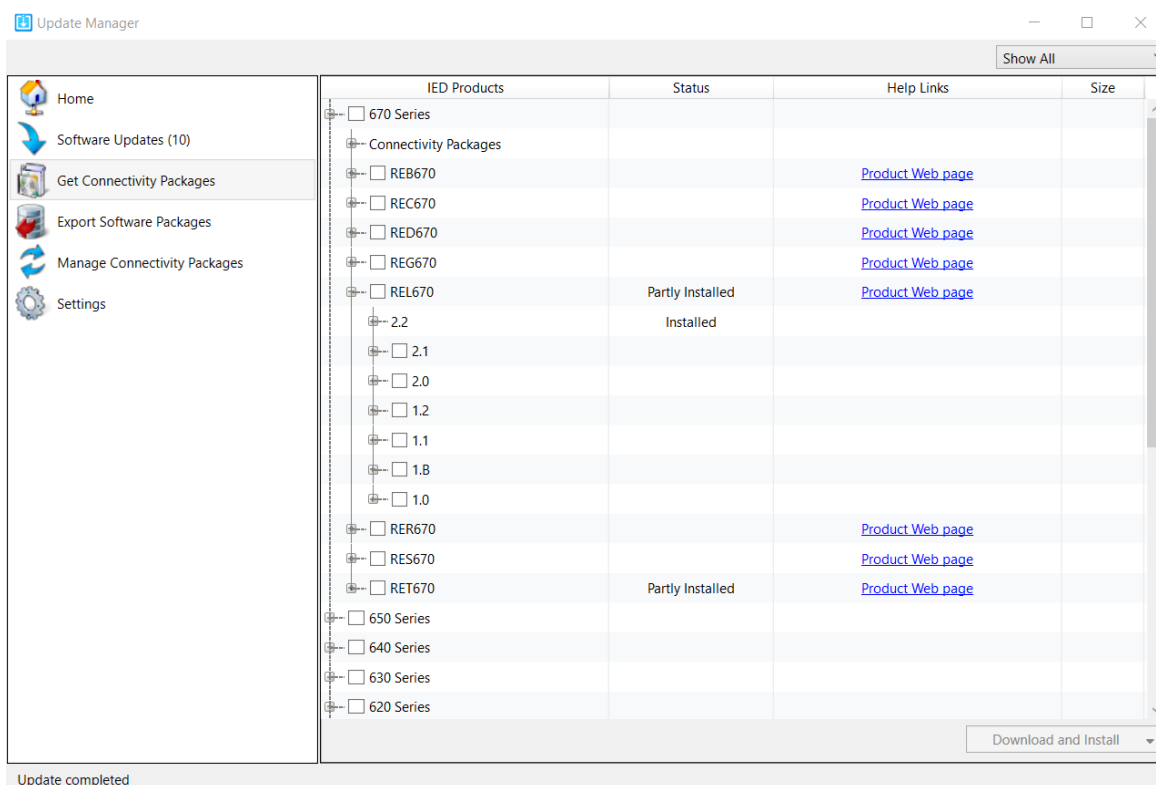


Figura 6.36: Interfaz gráfica del software Update Manager de ABB

El siguiente paso es crear la estructura de la planta en el Software PCM600 e insertar el IED.

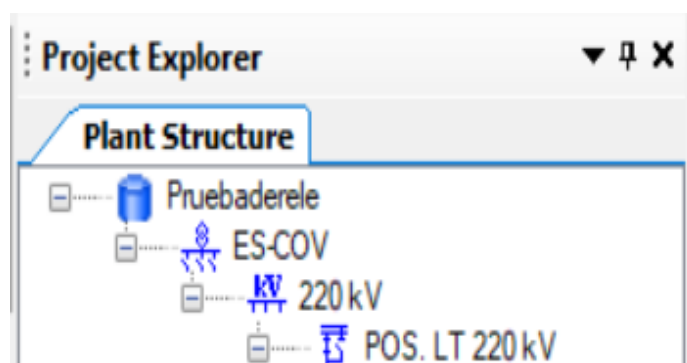


Figura 6.37: Creación de la estructura de planta en PCM600

Existen varias formas de insertar un IED, la primera es seleccionando el IED de la lista que aparece en el menú para agregar nuevo elemento como se muestra en la Figura 6.38.

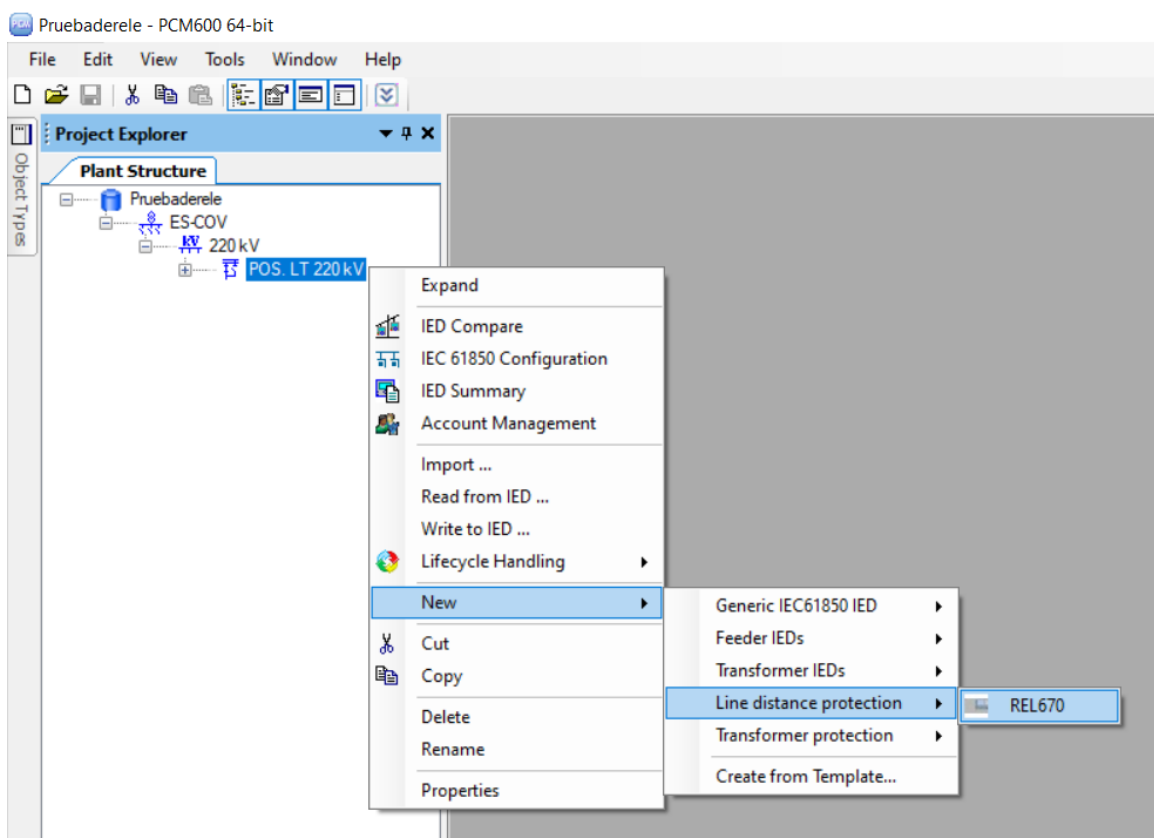


Figura 6.38: Inserción del IED REL670 en el proyecto

La segunda es cargando una plantilla con los archivos de preconfiguración como se puede observar en la Figura 6.39 y la tercera forma es importando una plantilla creada desde una carpeta.

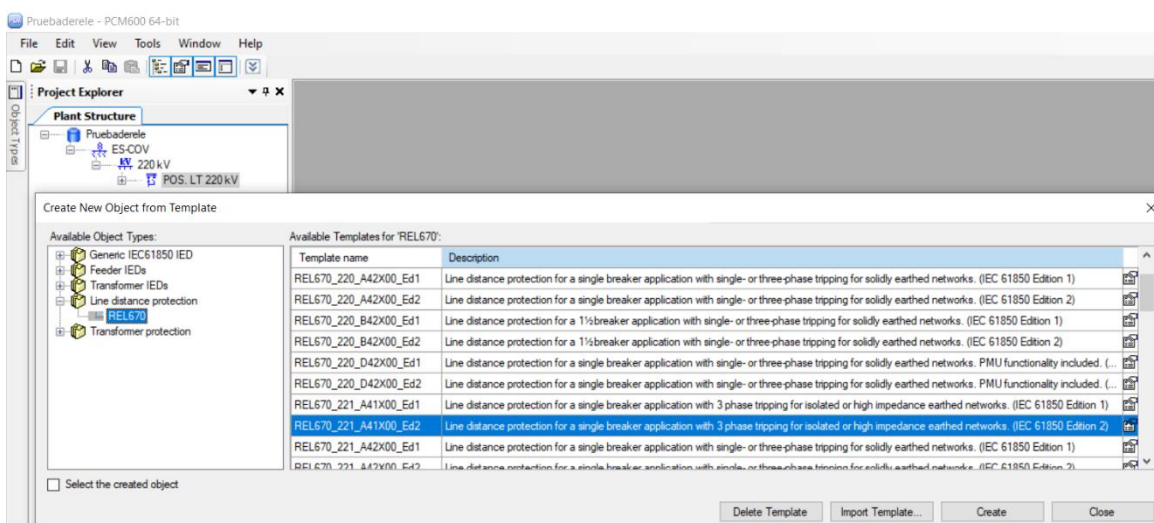


Figura 6.39: Inserción de un IED a partir de plantilla con preconfiguración

Al agregar un nuevo IED, se deben configurar ciertos parámetros como el modo de configuración:

- Online: para realizar la configuración con un IED físico conectado a la computadora.
- Offline: para realizar la configuración sin tener conectado un IED físico a la computadora.

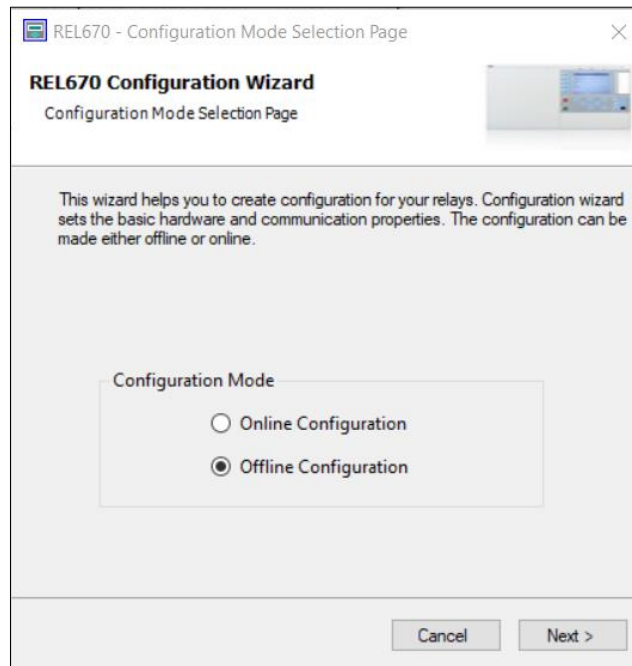


Figura 6.40: Página de selección del modo de configuración

El protocolo de comunicación a utilizar:

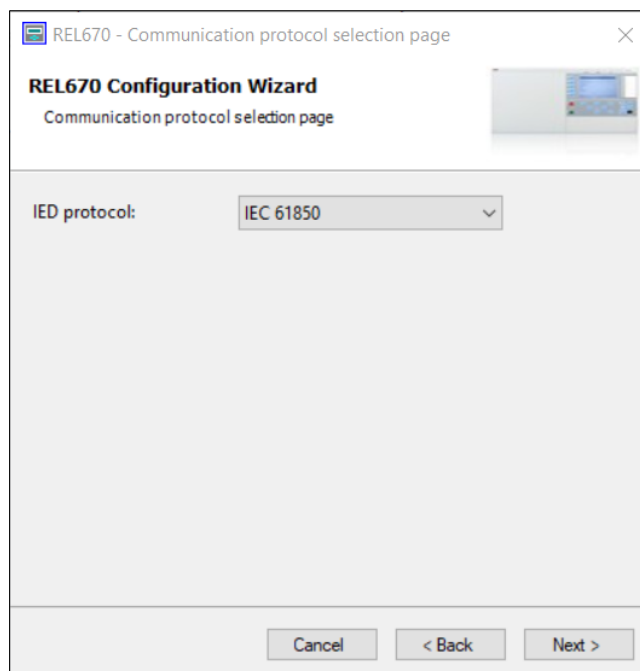


Figura 6.41: Página de selección del protocolo de comunicación

Selección del puerto de comunicación y la dirección IP del IED.

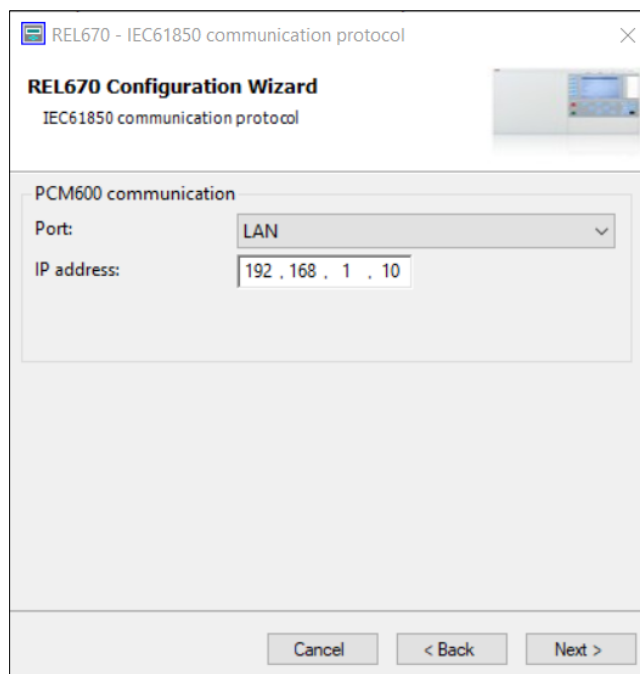


Figura 6.42: Página de configuración del protocolo de comunicación

Configuración de la versión del producto y de la edición de la norma IEC61850.

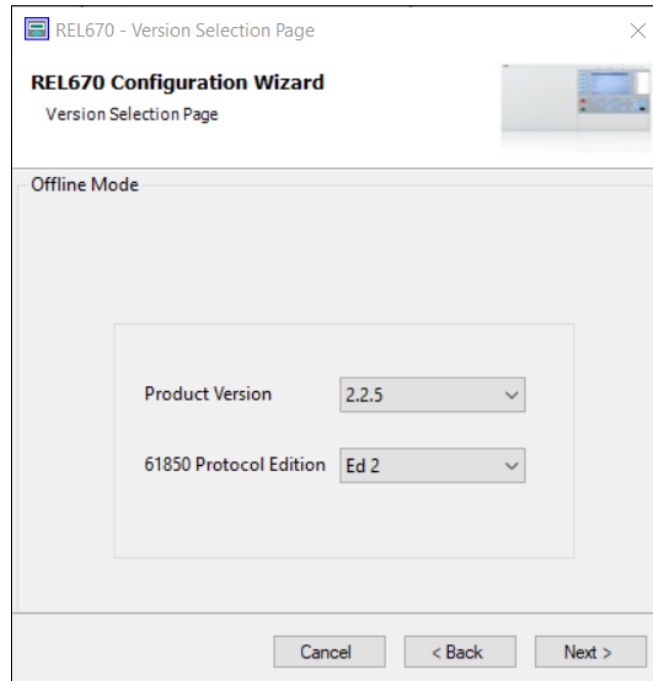


Figura 6.43: Página de selección de la versión del producto

Página de búsqueda del archivo de orden específico:

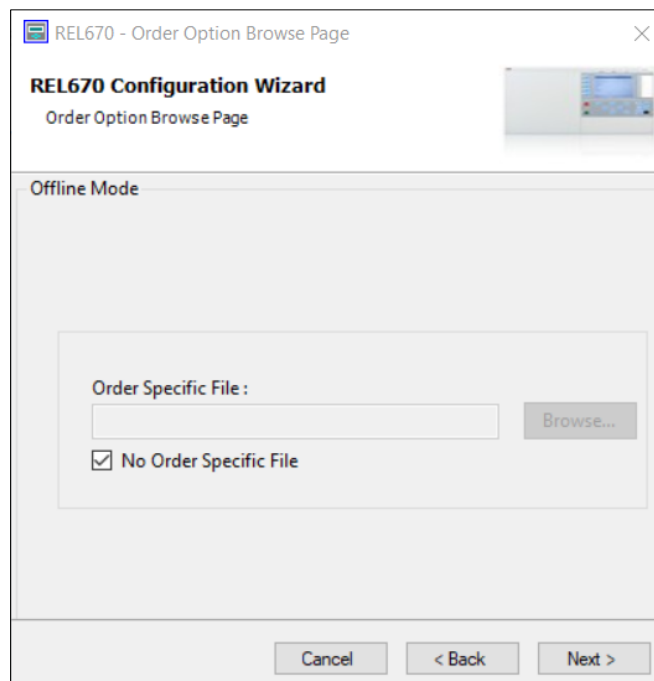


Figura 6.44: Selección del archivo de orden específico

Seleccionar versión y norma para el display gráfico.

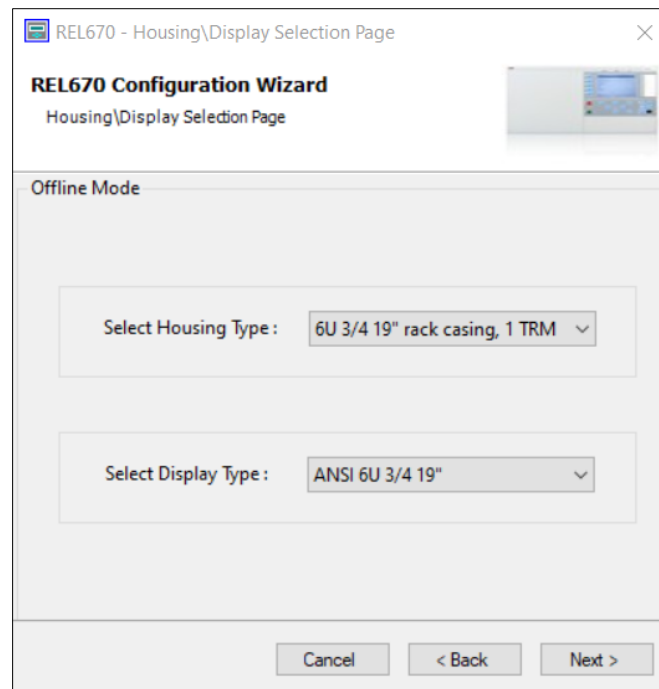


Figura 6.45: Página de selección de las características específicas del IED

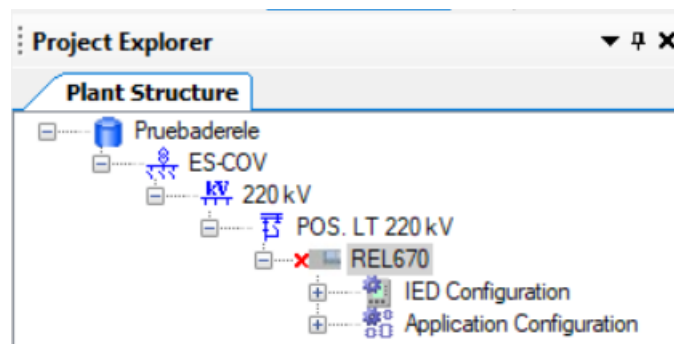


Figura 6.46: IED agregado a la estructura de planta del proyecto

6.1.7.2.7.5. Herramienta de configuración de aplicación - ACT/SMT

Con esta herramienta se realiza la configuración lógica del IED.

Luego de abrir la herramienta de configuración de aplicación como se ve en la Figura 6.35, se debe crear una nueva hoja de aplicación como se muestra en la Figura 6.47.

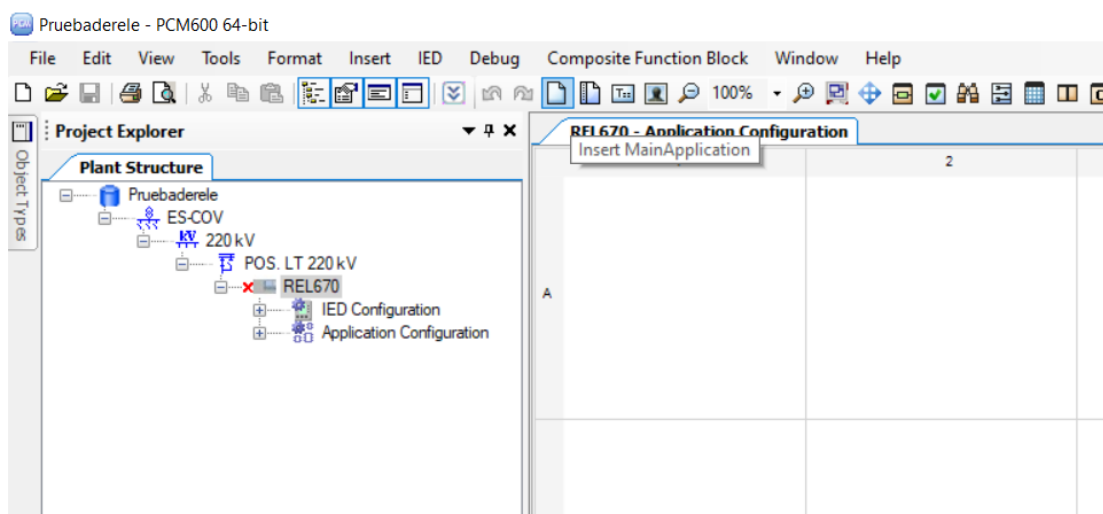


Figura 6.47: Creación de nueva hoja de aplicación

Se deben crear páginas de aplicación para cada apartado de la configuración lógica como por ejemplo la página para las entradas analógicas, las entradas binarias, la función de protección, lógica de disparo y las salidas como se muestra en la figura siguiente.

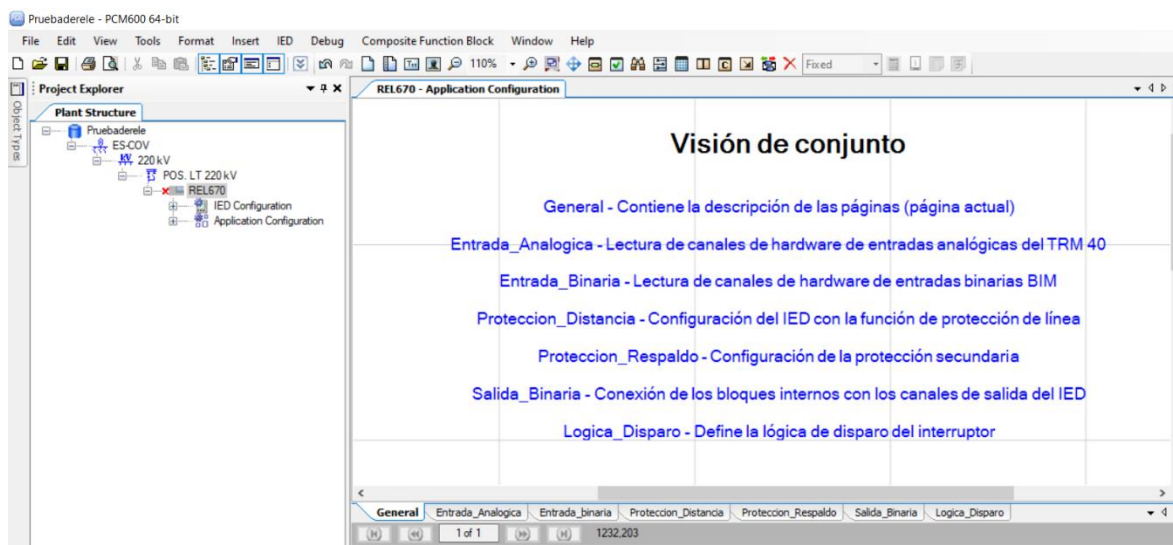


Figura 6.48: Páginas de configuración de aplicación

6.1.7.2.7.6. Inserción de bloques de función

Los bloques de función son los elementos principales de la configuración de una aplicación. Están diseñados para varias funciones y organizados en grupos de

tipos. Los diferentes tipos de bloques de funciones se muestran en la Vista de tipos de objeto. La Figura 6.49 presenta una descripción general de las partes principales que son relevantes para los bloques de funciones. Mientras que la Tabla 6.8 describe las partes mencionadas [31].

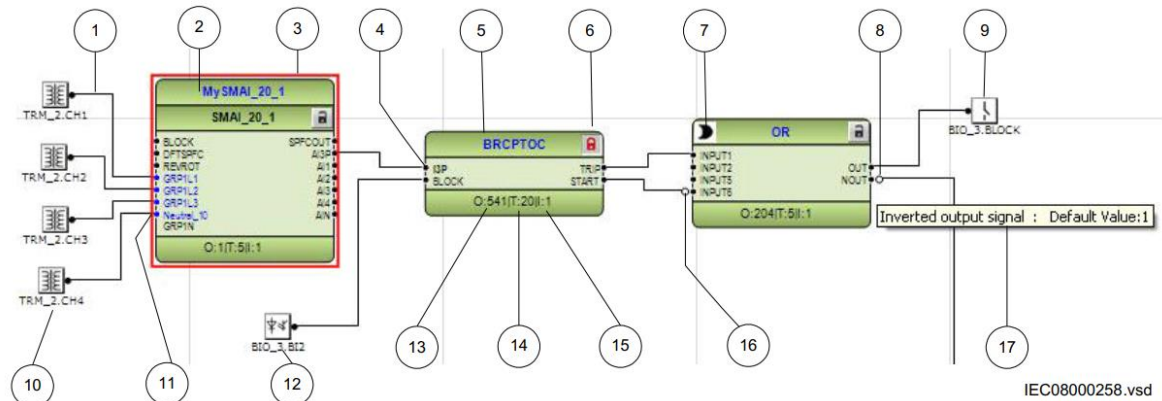


Figura 6.49: Partes principales de los bloques de funciones

Número	Descripción
1	Conexión (es)
2	Nombre del bloque de funciones definido por el usuario
3	Bloque de función, seleccionado (rojo)
4	Señal obligatoria (indicada por un triángulo rojo si no está conectada)
5	Nombre del bloque de funciones
6	Bloque de funciones, bloqueado (rojo)
7	Símbolo ANSI
8	Salida invertida
9	Hardware, canal de salida binaria
10	Hardware, canal de entrada analógica
11	Nombre de señal definido por el usuario
12	Hardware, canal de entrada binaria
13	Orden de ejecución
14	Tiempo del ciclo
15	Número de instancia
16	Entrada invertida
17	Nota de descripción de señal

Tabla 6.8: Descripción de las partes principales de los bloques de funciones [31]

Lógica de aplicación

El funcionamiento del sistema de protección de línea sigue una lógica de actuación compuesta por diferentes elementos detallados en la figura siguiente.

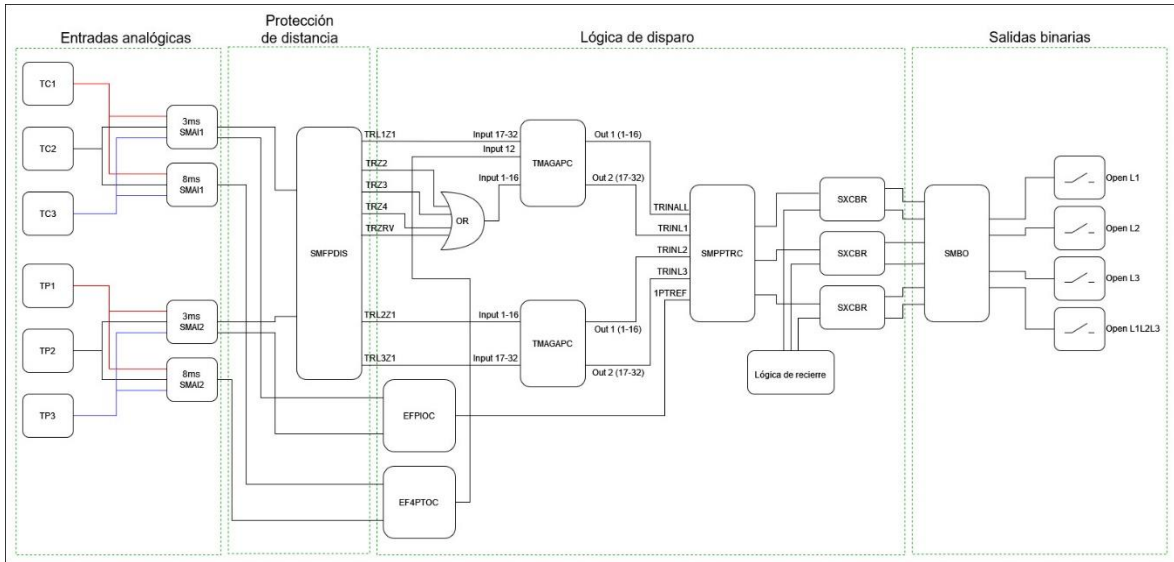


Figura 6.50: Lógica de protección de distancia para línea de transmisión

En primer lugar, la señal proveniente de los transformadores de instrumentos es recibida, filtrada y muestreada por el dispositivo de protección a través de convertidores analógico/digital. Este proceso se realiza como se indica en las siguientes figuras (Figura 6.51 y Figura 6.52).

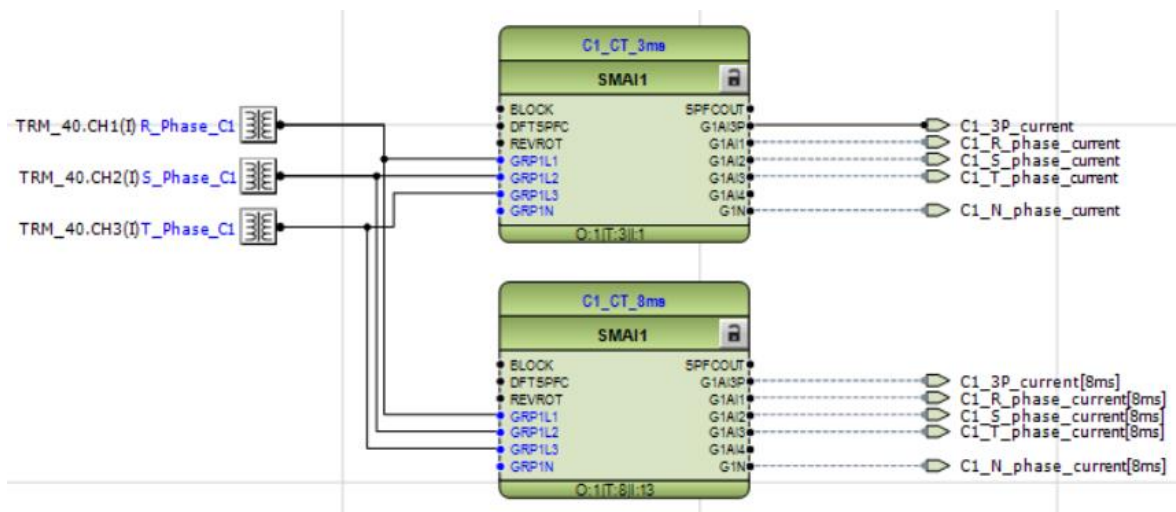


Figura 6.51: Entradas analógicas de los TC

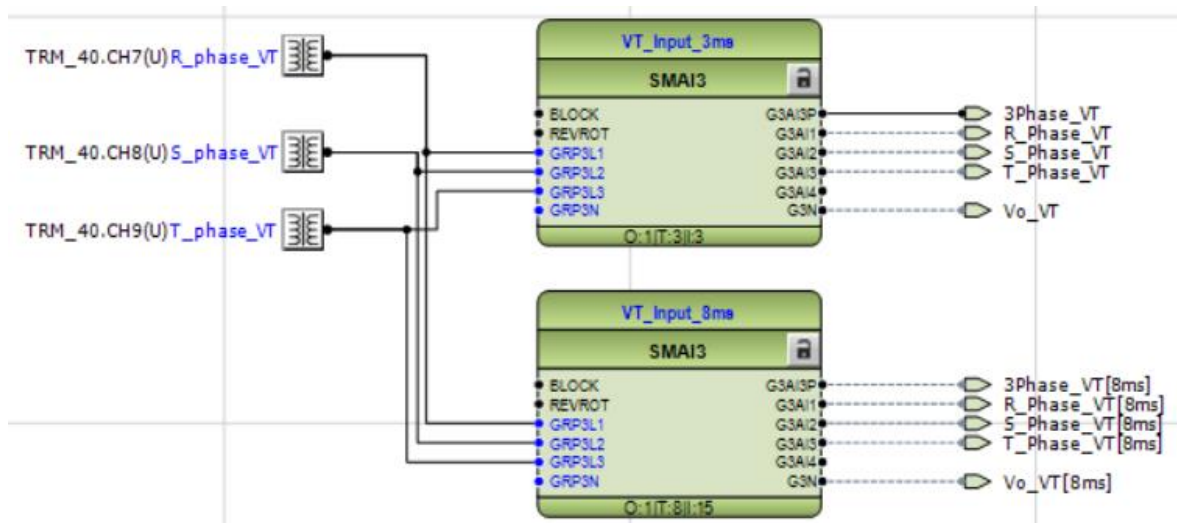


Figura 6.52: Entradas analógicas de los TP

Una vez digitalizada la señal analógica es recibida por el bloque de función de protección como se muestra en la figura de abajo.

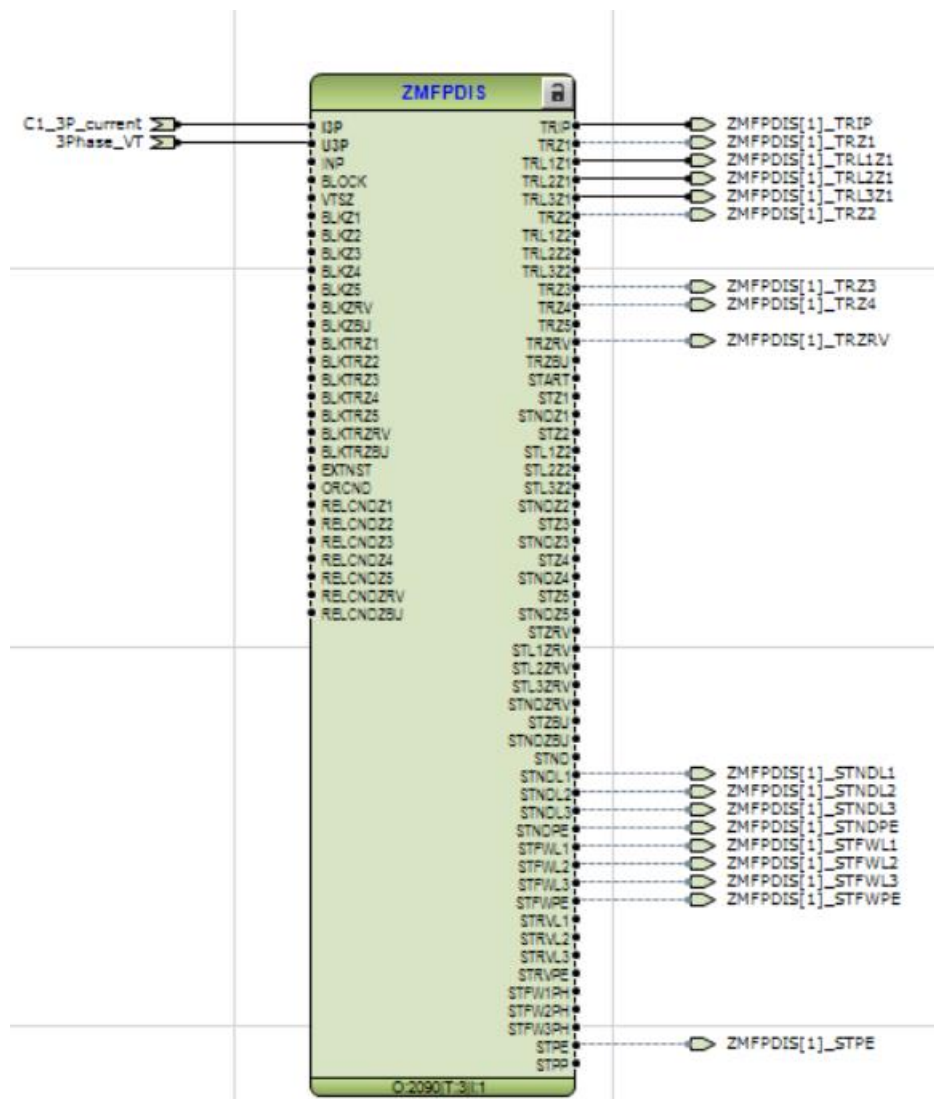


Figura 6.53: Bloque de función de protección de distancia

A continuación, el bloque de protección de acuerdo a su lógica de funcionamiento procesa dichas señales y envía a su vez las señales de control a los siguientes bloques de función de la lógica de disparo (Figura 6.54) para finalmente activar una salida binaria o contacto de relé (Figura 6.55).

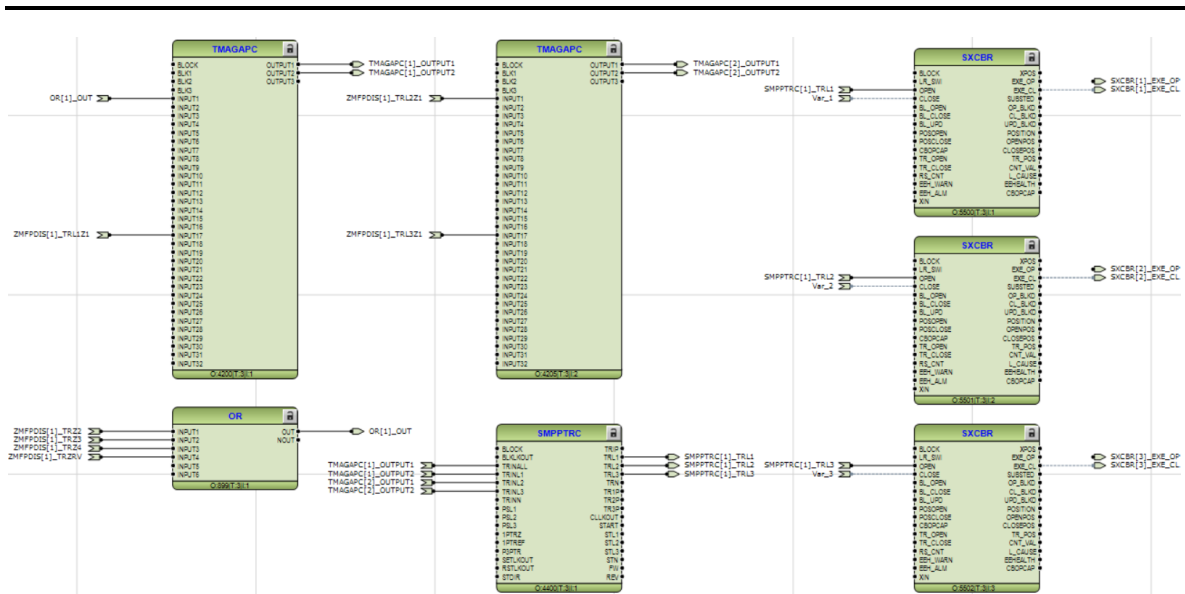


Figura 6.54: Bloques de función de la lógica de disparo

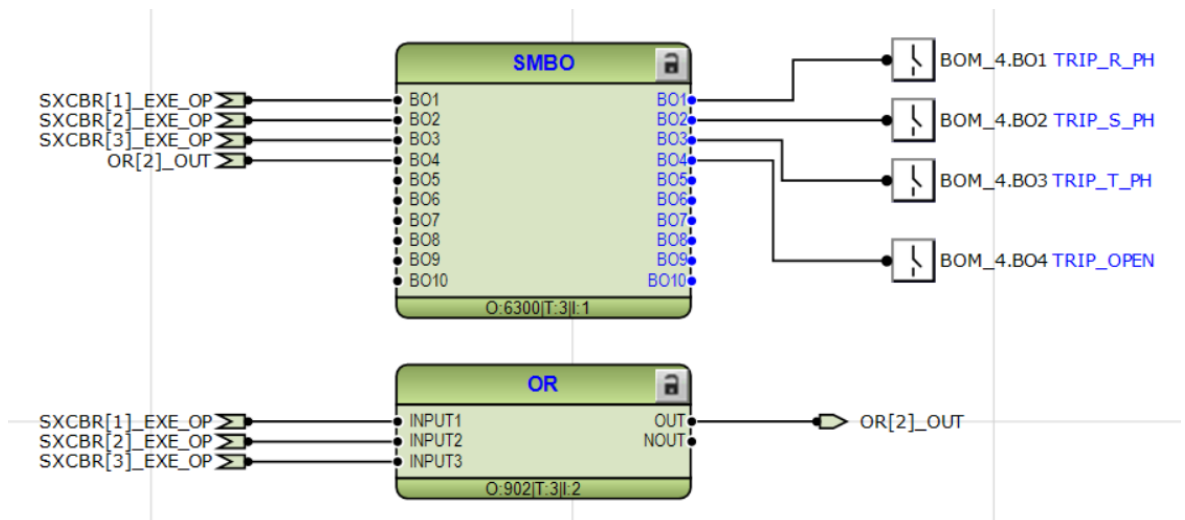


Figura 6.55: Salidas binarias

Otra representación de lo mencionado en relación a la lógica de protección se muestra en la figura siguiente.

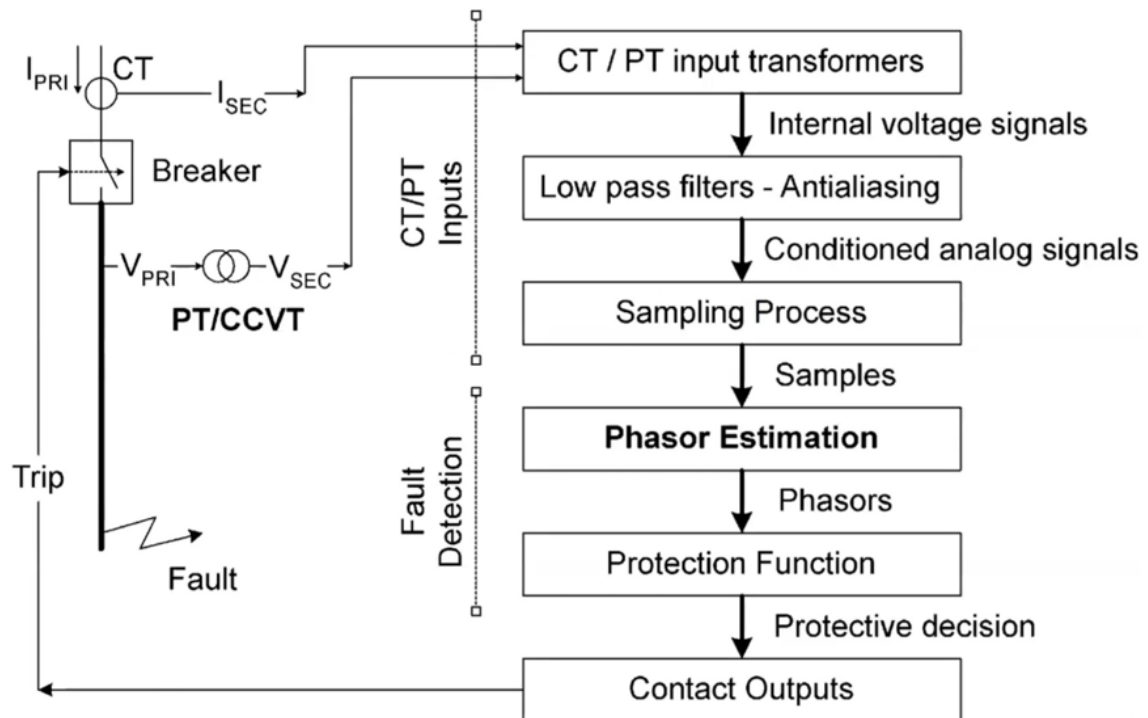


Figura 6.56: Funcionamiento de una protección de distancia de línea

6.1.7.2.7.7. Herramienta de parametrización - PST

Parametrización de elementos externos

Los elementos externos de este apartado son los transformadores de instrumentos. Las características de estos elementos pueden configurarse en el apartado de configuración de hardware, abriendo la herramienta de parametrización y seleccionando TRM dentro del explorador de proyecto del PCM600.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
TRM_40					
NAMECH1		CH1(I)			16 characters
ChannelType1		Off			
RatedTrans1		1,0	A	0,1	300,0
CTStarPoint1		ToObject			
✓ CTsec1		5	A	1	10
CTprim1		2000	A	1	99999
NAMECH2		CH2(I)			16 characters
ChannelType2		Off			
RatedTrans2		1,0	A	0,1	300,0
CTStarPoint2		ToObject			
CTsec2		5	A	1	10
CTprim2		2000	A	1	99999
NAMECH3		CH3(I)			16 characters
ChannelType3		Off			
RatedTrans3		1,0	A	0,1	300,0
CTStarPoint3		ToObject			
CTsec3		5	A	1	10
CTprim3		2000	A	1	99999
NAMECH4		CH4(I)			16 characters
ChannelType4		Off			
RatedTrans4		1,0	A	0,1	300,0
CTStarPoint4		ToObject			
CTsec4		5	A	1	10
CTprim4		2000	A	1	99999
NAMECH5		CH5(I)			16 characters
ChannelType5		Off			
RatedTrans5		1,0	A	0,1	300,0

Selected parameter: TRM_40/CTsec1 [1..10] A

Figura 6.57: Parametrización de canales de hardware

Parametrización entradas analógicas

Los parámetros tales como el tipo de conexión y el tipo de entrada analógica se configuran seleccionando el bloque dentro del apartado de configuración de aplicación correspondiente a dichas entradas analógicas.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ C1_CT_3ms: SMAI1: 1					
✓ AI1NAME		GRP1L1			16 characters
✓ AI2NAME		GRP1L2			16 characters
✓ AI3NAME		GRP1L3			16 characters
✓ AI4NAME		GRP1N			16 characters
✓ GlobalBaseSel		1		1	12
✓ DFTRExtOut		InternalDFTRef			
✓ DFTRreference		InternalDFTRef			
✓ ConnectionType		Ph-N			
✓ AnalogInputType		Current			

Figura 6.58: Parametrización de entradas analógicas para TC

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ VT_Input_3ms: SMAI3: 3					
✓ AI1NAME		GRP3L1			16 characters
✓ AI2NAME		GRP3L2			16 characters
✓ AI3NAME		GRP3L3			16 characters
✓ AI4NAME		GRP3N			16 characters
✓ GlobalBaseSel		1		1	12
✓ DFTRreference		InternalDFTRef			
✓ ConnectionType		Ph-N			
✓ AnalogInputType		Voltage			

Figura 6.59: Parametrización de entradas analógicas para TP

Parametrización para protección de distancia de línea

Los parámetros correspondientes a la protección de distancia de línea se cargan en la ventana de la figura. Dichos parámetros dependen de la longitud y las características técnica de los conductores de la línea de transmisión como así también de la característica de operación del relé diferencial.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
[+] Setting Group1					
Zone 1					
Setting Group1					
✓ OpModePPZ1		Quadrilateral			
OpModePEZ1		Quadrilateral			
X1PPZ1		30,00	Ohm/p	0,01	3000,00
R1PPZ1		5,00	Ohm/p	0,00	1000,00
X1PEZ1		30,00	Ohm/p	0,01	3000,00
R1PEZ1		5,00	Ohm/p	0,00	1000,00
X0Z1		100,00	Ohm/p	0,01	9000,00
R0Z1		15,00	Ohm/p	0,00	3000,00
X0MZ1		0,00	Ohm/p	0,00	9000,00
R0MZ1		0,00	Ohm/p	0,00	3000,00
RFPPZ1		30,00	Ohm/l	0,01	9000,00
RFPEZ1		100,00	Ohm/l	0,01	9000,00
tPPZ1		0,000	s	0,000	60,000
tPEZ1		0,000	s	0,000	60,000
IMinOpPPZ1		10	%IB	10	6000
IMinOpPEZ1		10	%IB	5	6000
Zone 2					
Setting Group1					
OpModePPZ2		Quadrilateral			
OpModePEZ2		Quadrilateral			
DirModeZ2		Forward			
X1Z2		40,00	Ohm/p	0,01	3000,00
R1Z2		5,00	Ohm/p	0,00	1000,00
X0Z2		120,00	Ohm/p	0,01	9000,00
R0Z2		15,00	Ohm/p	0,00	3000,00

Selected parameter: ZMFPDIS: 1/Zone 1/Setting Group1/OpModePPZ1

Figura 6.60: Parametrización de protección de distancia de línea

Es importante tener en cuenta que la clave técnica en el PCM600 debe ser igual a la del dispositivo físico para que la escritura en este último sea exitosa.

FIGURA DE ZONA DE PROTECCION

6.1.7.3. Inyector de corriente tensión (probador de relé)

El dispositivo probador de relé, como se ha mencionado con anterioridad, desempeñará la función tanto de los transformadores de medida como la simulación de una falla durante las prácticas de laboratorio.

En este caso se ha seleccionado un dispositivo menos conocido en el campo profesional, por ser más accesible económicamente. Se trata del HT-802 con 3 salidas de corrientes y 3 salidas de tensión para prueba. La Figura 6.61 muestra una vista frontal del equipo.



Figura 6.61: Probador de relé HT-802

6.1.7.4. Interruptor

Para la función del interruptor se utilizará un contactor electromecánico con contactos auxiliares para la señalización e indicación de posición asociado a un led.

Las características técnicas deseables para este dispositivo a modo referencial se mencionan las siguientes:

- Voltaje de alimentación de la bobina: 24 Vdc
- Número de polos: 3

- Contactos auxiliares: 1 NC + 2NC + 2NO (módulo auxiliar)
- Tensión de empleo: AC/DC



Figura 6.62: Contactor electromecánico

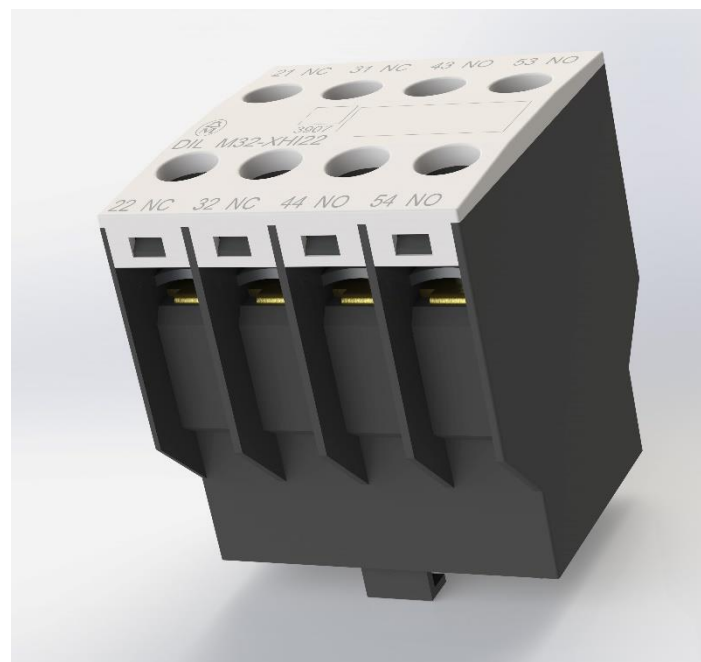


Figura 6.63: Contactos auxiliares de contactor electromecánico

6.1.7.5. Fuente de alimentación

El módulo didáctico requiere de una fuente de alimentación en corriente directa DC. Esta fuente puede ser un dispositivo rectificador de 220 VAC a 24 VDC, con la capacidad suficiente para abastecer al dispositivo de protección y al módulo didáctico en general. Se opta por este nivel de tensión para evitar riesgos de choques eléctricos. Según norma UNE HD384-4-41 los valores de tensión de 50 voltios para arriba ya resultan peligrosos.



Figura 6.64: Imagen ilustrativa de una fuente de tensión rectificada

6.1.7.6. Panel de montaje

El panel para el montaje de los equipos para la práctica de laboratorio será de madera contrachapada, con las siguientes dimensiones:

- Largo: 1,5 m
- Alto del panel: 1 m
- Altura de soportes: 0,7 m
- Altura total panel + soporte: 1,7 m

La siguiente imagen muestra una vista frontal de la bancada didáctica proyectada.

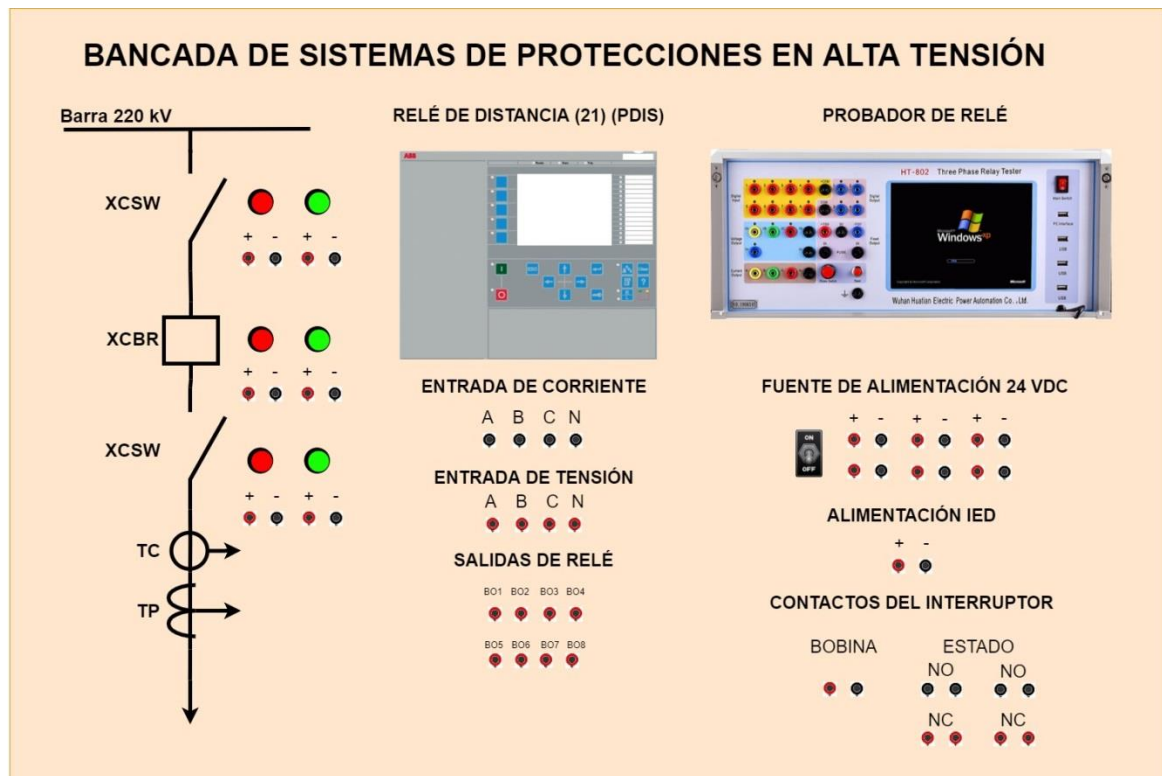


Figura 6.65: Vista frontal del tablero de prácticas

Fuente: Elaboración propia

6.1.7.7. Software de simulación seleccionado

El software de simulación seleccionado corresponde al DigSilent Power Factory con licencia educativa o de estudiante.

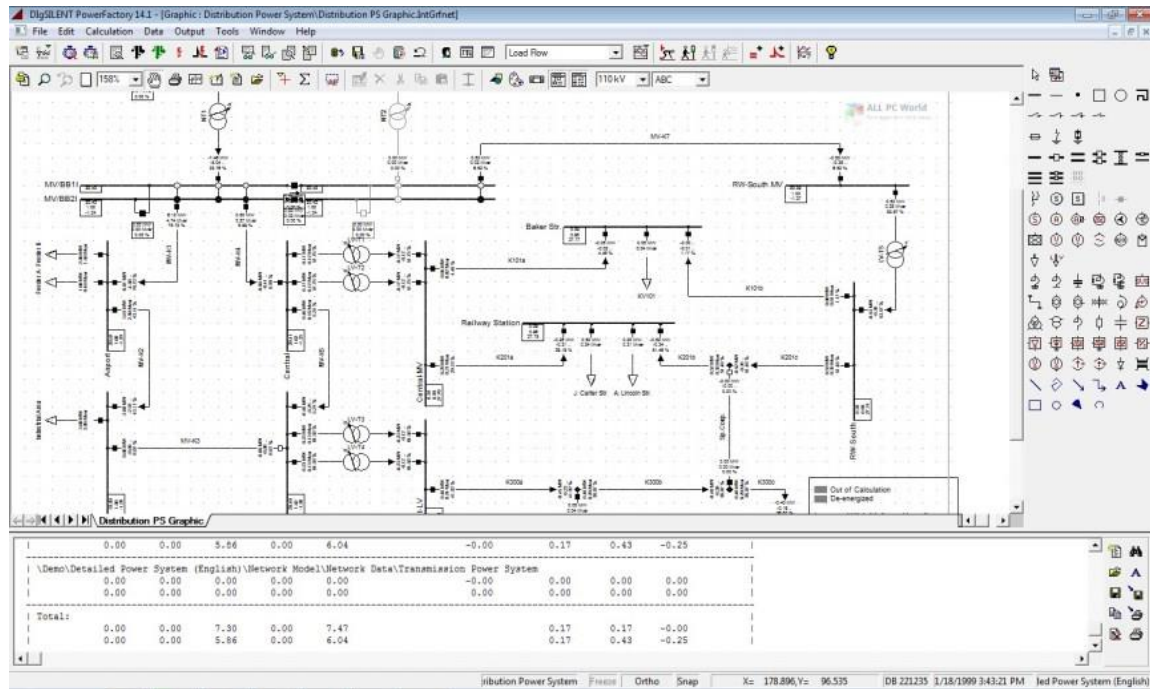


Figura 6.66: Interfaz gráfica del software de simulación seleccionado

Para la ejecución del software es necesario adquirir una computadora de escritorio o una portátil con las características adecuadas.

6.1.8. Plan de prácticas para el Laboratorio didáctico

6.1.8.1. Práctica N° 1: Identificación de todos los elementos del laboratorio didáctico

Descripción

Identificación de todos los elementos del laboratorio didáctico, como fuentes de alimentación, IED, interruptores, diagramas de conexión, simbología, puertos de comunicación, interfaces HMI, bornes de conexión, software de programación, manuales, normas relacionadas a las prácticas eléctricas, equipos de prueba, señalizaciones.

Objetivos de la práctica

- Identificar los elementos del laboratorio didáctico
- Conocer los nombres de cada elemento
- Comprender la relación entre los diferentes elementos

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. Se trata de primera aproximación al laboratorio de práctica de protecciones eléctricas, por lo que estará enfocado principalmente a la identificación de todas las partes existentes, es decir, los principales elementos del banco didáctico de práctica.

Puede acompañarse con una lista impresa de los elementos con sus definiciones y funciones dentro del circuito de protección. Como parte de la actividad se deben identificar la relación entre los distintos elementos.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

Precauciones

Como se trata de una actividad de reconocimiento inicial no se trabajará con partes energizadas, no obstante, se recomienda el uso de zapatones de seguridad para el acceso al laboratorio.

6.1.8.2. Práctica N° 2: Identificación de las funciones de cada elemento en un sistema de protección

Descripción

Esta práctica se enfoca al estudio detallado de las funciones de cada elemento del banco didáctico, y su relación con el sistema de protección real existente en un sistema de transmisión de potencia. Como el laboratorio está diseñado como un reflejo del sistema de protección existente en subestaciones eléctricas, se deben estudiar primeramente esos elementos para que la práctica sea beneficiosa.

Objetivos

- Identificar los elementos del sistema de protección en el banco de prácticas
- Numerar las funciones de cada elemento del sistema de protección

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. En la primera practica se habían identificado los diferentes elementos del banco didáctico, en esta práctica se deben numerar las funciones de esos elementos dentro del sistema de protección.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

Precauciones

En esta práctica no se tienen partes energizadas por lo que existe riesgo de choque eléctrico. Sin embargo, se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para todas las prácticas dentro del laboratorio de electricidad.

6.1.8.3. Práctica N° 3: Medición y comprobación del estado y de las condiciones de trabajo de los dispositivos

Descripción

Mediciones, verificación de funcionamiento de los elementos del banco didáctico para evitar averías por niveles erróneos de alimentación o resultados inesperados por el mal funcionamiento de los diferentes contactos de los dispositivos actuadores.

Objetivos

- Comprobar estado de las entradas y salidas
- Verificar los valores de tensión de la fuente de alimentación
- Verificar las características técnicas de cada equipo

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. La práctica está enfocada en la comprobación técnica de las magnitudes de alimentación de los diferentes equipos a través de la medición de las salidas de las fuentes de acuerdo a las especificaciones de cada elemento.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

Precauciones

En esta práctica ya se activan los elementos del banco didáctico, por lo que ya están presentes partes energizadas, se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso y la manipulación del banco didáctico del laboratorio.

6.1.8.4. Práctica N° 4: Introducción a la herramienta de programación

Descripción

Esta práctica consiste en la visualización de aspectos generales del programa de configuración del IED, presentación del software y sus diferentes herramientas tales como la de configuración de aplicación, matriz de señales, habilitación de hardware, de parametrización entre otras.

Objetivos

- Identificar las diferentes herramientas del PCM600
- Importar de archivos SCL
- Identificar las herramientas del Software

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. En esta práctica se expone el procedimiento para la creación de proyectos en el software, la creación de la estructura de planta, la importación de plantillas del IED o el IED con preconfiguración así como la importación, edición y exportación de archivos SCL. El docente explica la funcionalidad de cada herramienta dentro del software PCM600.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

Precauciones

En esta práctica se tienen elementos del bando didáctico energizados, por lo que se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso y la manipulación del banco didáctico del laboratorio.

6.1.8.5. Práctica N° 5: Programación offline

Descripción

En esta práctica se realiza la ingeniería de proceso del IED, que abarca la creación de proyecto, elaborar la estructura de planta, agregar el IED ABB REL670 en modo offline, configurar los módulos, programar y parametrizar el REL670 para su aplicación como dispositivo de protección de líneas de transmisión.

Objetivos

- Programar la aplicación lógica del IED
- Parametrizar los bloques funcionales del IED
- Guardar los archivos SCL
- Analizar el funcionamiento de los bloques funcionales en la programación del IED

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. Cada grupo realiza la programación lógica del relé con la función de protección de línea con ayuda de la herramienta de configuración de aplicación disponible en el software PCM600. Una vez hecha la programación lógica, se debe realizar la parametrización de los bloques de función utilizados dentro de la configuración lógica mediante la herramienta de parametrización (PST) también disponible dentro del software utilizado.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

El docente debe realizar una retroalimentación de la experiencia de la práctica mencionando los resultados positivos logrados como un resumen de los conocimientos adquiridos a partir de los informes presentados por los alumnos.

Precauciones

En esta práctica se tienen elementos del bando didáctico energizados, por lo que se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso y la manipulación del banco didáctico del laboratorio.

6.1.8.6. Práctica N° 6: Validación de la programación y carga del programa al relé REL670

Descripción

Durante esta práctica se conectará el IED ABB REL670 a la computadora mediante la interfaz de comunicación para permitir que la programación realizada en el modo offline con el software PCM600 sea transferida al mismo.

Objetivos

- Identificar las conexiones físicas entre el IED y la computadora de programación
- Cargar el programa al IED
- Comprobar el proceso de validación

Procedimientos

Partiendo de la programación realizada en la práctica N° 5, se debe continuar con el mismo grupo y realizar el proceso de conexión física entre la computadora de programación y el relé REL670. Una vez lograda la comunicación entre los equipos, se debe realizar la carga del programa al dispositivo. Se debe tener en cuenta que los equipos tanto físico como el insertado en el PCM600 deben tener la misma clave técnica para que la escritura sea exitosa.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

El docente debe realizar una retroalimentación de la experiencia de la práctica mencionando los resultados positivos logrados como un resumen de los conocimientos adquiridos a partir de los informes presentados por los alumnos.

Precauciones

En esta práctica se tienen elementos del bando didáctico energizados, por lo que se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso y la manipulación del banco didáctico del laboratorio.

6.1.8.7. Práctica N° 7: Prueba de relé

Descripción

Esta práctica consiste en probar las funciones de protección del relé bajo diferentes condiciones de prueba con el equipo inyector de corriente y tensión disponible en el banco didáctico.

Objetivos

- Identificar las conexiones de corriente y tensión del IED y el probador
- Realizar las conexiones físicas entre el probador y el IED
- Probar las funciones de protección del relé
- Analizar resultados de prueba

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos de 4 o 5 integrantes acompañados por el docente. Se deben realizar las conexiones físicas pertinentes entre el relé ABB REL670 y el probador de relé HT-802. El docente debe asegurarse de que las conexiones físicas entre los elementos sea el adecuado para proceder a la prueba según diferentes condiciones ya predeterminadas dentro del equipo de pruebas. Estas condiciones de prueba predeterminadas para la función de protección de líneas de transmisión deben seleccionarse en la interfaz HMI que posee el dispositivo probador y empezar la prueba una vez verificadas todas las conexiones mencionadas.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

El docente debe realizar una retroalimentación de la experiencia de la práctica mencionando los resultados positivos logrados como un resumen de los conocimientos adquiridos a partir de los informes presentados por los alumnos.

Precauciones

En esta práctica se tienen elementos del bando didáctico energizados, por lo que se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso y la manipulación del banco didáctico del laboratorio.

6.1.8.8. Práctica N° 8: Simulación de protecciones con DigSilent Power Factory

Descripción

La práctica consiste en simular condiciones típicas de fallas en líneas de transmisión para la mejor comprensión de conceptos asociados a la asignatura.

Objetivos

- Modelar una posición de línea de transmisión alta tensión
- Insertar parámetros técnicos asociados a líneas de transmisión y a las funciones de protección
- Simular fallas en líneas de transmisión con la ayuda del software
- Comparar resultados de simulación con pruebas reales en el relé

Procedimientos

Posterior a la conformación de grupos reducidos de 4 a 5 integrantes se accede al laboratorio con el docente responsable. En la PC destinada para la configuración y parametrización del IED, dentro del cual se tendrá instalado el software de simulación DigSilent Powerfactory se llevará a cabo la modelación del circuito a simular.

Evaluación

Se debe redactar un informe de la experiencia en el laboratorio, detallando las actividades realizadas y los conocimientos adquiridos.

Precauciones

Esta práctica está enfocada al trabajo de simulación por ordenador, por lo existe riesgo de choque eléctrico. No obstante, se recomienda el uso de zapatones de seguridad y guantes para baja tensión para el acceso al laboratorio.

6.1.9. Materiales y costos del proyecto de modulo didáctico para la práctica de protecciones eléctricas

En la siguiente tabla se presenta la lista de materiales para la construcción del módulo didáctico.

Material	Descripción	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
ABB REL670	Relé Multifunción	1	9000	9000
HT 802	Probador de Relé más costo de envío	1	5500	5500
Panel para montaje	Estructura de metal para montaje de dispositivos	1	120	120
conectores	Tipo banana	50	1	50
Contactos auxiliares	Contactores, relés pequeños	2	15	30
Luces de señalización	Tipo LED 24 Vdc	8	3	24
Diagramas	Impresión	1	30	30
Panel de montaje	Madera, metal	1	30	30
Rollo de Cable	Conductores para conexión	1	20	20
PC	De escritorio o portátil	1	500	500

TOTAL	15.304
-------	--------

Tabla 6.9: Lista de materiales y costos

Fuente: Elaboración propia

La construcción del banco didáctico tendrá un costo de aproximadamente 15.304 USD.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo del presente proyecto final de grado se ha realizado el diseño de un laboratorio para práctica de protecciones en sistemas eléctricos, abordando específicamente las protecciones utilizadas en subestaciones eléctricas de alta tensión. Para la contextualización del proyecto, se ha tomado como referencia datos del sistema de transmisión centro que abarca la zona geográfica que incluye a la institución donde se desarrolla el curso de grado.

A partir de la muestra seleccionada se han identificado los principales elementos de un sistema moderno de protección eléctrica aplicado a alta tensión. Entre los principales elementos identificados se mencionan el dispositivo de protección o relé, los interruptores de potencia, los transformadores de tensión y de corriente, las fuentes de alimentación, los dispositivos auxiliares de interconexión eléctrica, entre otros.

Tomando como referencia los elementos necesarios para la construcción del banco de prácticas para el laboratorio de protecciones eléctricas, se han elaborado criterios para seleccionar las opciones más convenientes para el proyecto. Con el análisis de los datos a nivel de 220 kV recabados de las subestaciones tomadas como muestra se ha encontrado que la protección más numerosa en el sistema corresponde a la protección de línea de transmisión.

El dispositivo de protección fue seleccionado teniendo en cuenta dos aspectos, la función de protección y el fabricante. Con relación a la función se ha seleccionado un relé multifunción orientado a protecciones de líneas de transmisión, por ser ese tipo de circuito el más numeroso dentro del sistema de referencia. Mientras que según el fabricante se ha optado por el que pone a disposición los elementos para la configuración de los equipos sin necesidad de adquirir el producto físico.

Con relación a los transformadores de tensión y de corriente resultan innecesarios para un banco de prácticas, por no contarse con tensiones elevadas que deban ser reducidas. No obstante, se deben tener condiciones de falla para la operación del relé, lo cual es posible con un probador de relé o maletín de prueba de relé. Para la selección del probador se han definido algunos criterios, resultando finalmente

un modelo que posee las prestaciones requeridas en el proyecto a un menor costo de adquisición.

Los demás elementos secundarios como interruptores, fuentes de alimentación y demás componentes del sistema de protección fueron seleccionados según los requerimientos técnicos mínimos.

Para la selección del software de simulación se han comparado varios disponibles, resultando seleccionado el que más se ajusta a las exigencias para la asignatura de protecciones en sistemas eléctricos.

Con todos los elementos del laboratorio seleccionado se ha diseñado el banco de prácticas para el laboratorio de protecciones eléctricas de la Facultad de Ciencias y Tecnología, con los detalles técnicos necesarios para su puesta su construcción. Se ha elaborado también una guía de prácticas que servir como referencia para las prácticas de la asignatura mencionada.

Finalmente se elaboró el presupuesto del proyecto del diseño de laboratorio para práctica de protecciones eléctricas. No se ha podido realizar un análisis de costo beneficio por tratarse de un aporte para la institución, del cual se espera beneficios reflejados en una formación más integral de los futuros egresados de la carrera de Ingeniería Eléctrica. No obstante, al contar con un laboratorio exclusivamente enfocado a las protecciones en subestaciones eléctricas, la facultad puede elaborar cursos de protección orientados a profesionales técnicos para el aprovechamiento del laboratorio y generar ingreso para compensar la inversión realizada.

VI. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente proyecto se tiene como resultado el diseño de un laboratorio para práctica de protecciones en sistemas eléctricos enfocado a protecciones en subestaciones de alta tensión. Este laboratorio posee como principal elemento un banco de práctica que incluye las partes principales de un sistema de protección de una línea de transmisión en alta tensión que posibilitará a los estudiantes la manipulación de dichos elementos, que en otras circunstancias serían imposibles.

Durante el diseño del banco de práctica se han considerado las normas de seguridad aplicadas a prácticas de laboratorio, para asegurar la integridad de los estudiantes durante el proceso de su formación. Del mismo modo se ha asegurado que cada uno de los elementos del laboratorio incluido el software de simulación sea seleccionado según criterios objetivos.

Como parte del diseño se presenta una vista del banco de práctica con sus diferentes elementos constitutivos acompañado de una guía de prácticas de referencia para el buen aprovechamiento del equipo didáctico. El presupuesto del laboratorio considerando su instalación en el edificio existente de la institución alcanza 15.304 USD.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda la construcción de un edificio exclusivo para las prácticas en alta tensión, de esta manera es posible recrear condiciones más próximas a la realidad de las subestaciones eléctricas.

Partiendo del presente proyecto y utilizando el mismo dispositivo multifunción seleccionado se recomienda la ampliación del panel para practicar otras funciones de protección no abarcadas en este proyecto como protección diferencial de línea, protección de sobre corriente, protección de sobretensión, etc.

Se recomienda la firma de convenios con instituciones públicas como la ANDE para la adquisición de los elementos del laboratorio para reducir los costos del mismo.

Como posible fuente de ingreso para la institución educativa puede realizarse convenio con empresas contratistas de la ANDE para la formación de sus técnicos en área de configuración de dispositivos IED utilizados en subestaciones eléctricas, utilizando el laboratorio y la bancada didáctica para facilitar el proceso.

Se recomienda el diseño y posterior construcción de bancos de prácticas similares al diseñado en este trabajo para aquellas asignaturas profesionales de difícil comprensión de la carrera, como estaciones eléctricas, centrales eléctricas, sistemas eléctricos de potencias, máquinas eléctricas, entre otras.

VIII. APÉNDICE

APÉNDICE A: RESUMEN EJECUTIVO

7.1. APÉNDICE A.1:

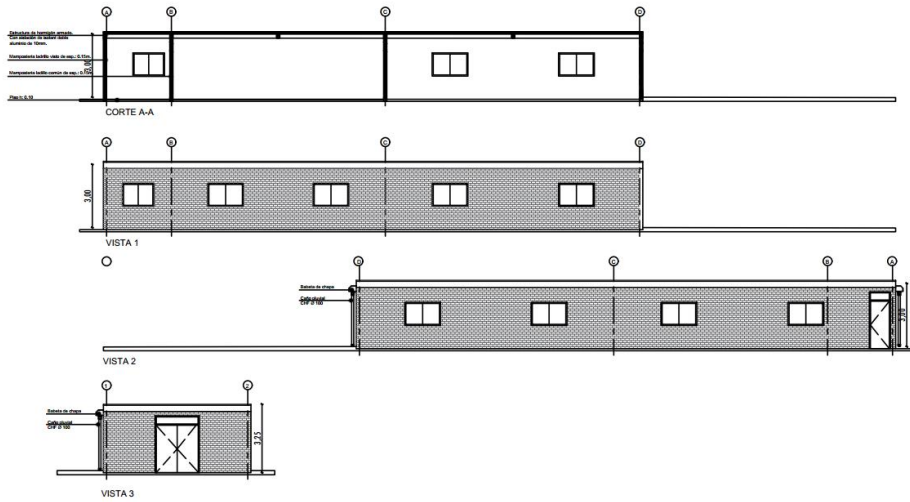


Figura 7.1: Vista del plano de sala de laboratorio propuesto, Elaboración Propia.

IX. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. F. Ramirez, SUBESTACIONES DE ALTA Y EXTRA ALTA TENSIÓN, Colombia: Mejia Villegas, 2003.
- [2] J. R. Martín, Diseño de subestaciones eléctricas, México, D.F.: McGraw-Hill, 1992.
- [3] . R. Valdés, «Electro industria,» SUBESTACIONES DIGITALES:El camino hacia una red Inteligente, [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2474&xit=subestaciones-digitales-el-camino-hacia-una-red-inteligente>. [Último acceso: 10 Agosto 2021].
- [4] Inel, «Inel,» [En línea]. Available: <https://inelinc.com/>.
- [5] CARONI RIVER CROUP, «Automatización de subestaciones eléctricas con la Norma IEC 61850,» CARONI RIVER CROUP, Lima, 2019.
- [6] C. F. Fuentes Estrada, «LA IMPLMENTACIÓN DE LA NORMA IEC 61850 EN CFE: TRAZANDO LA RUTA DE LA INNOVACIÓN EN LA AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES,» AI-Mexico, Mexico, 2012.
- [7] M. A. Toscano Palacios, «Automatización de una Subestación Eléctrica utilizando el Protocolo IEC 61850 y el ICCP para el envío de Datos,» UNIVERSIDAD RICARDO PALMA, Lima, 2010.
- [8] J. Bernal, N. Herrera y J. Monteagudo, «APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850 EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES Y MEDICIONES ELÉCTRICAS EN SUBESTACIONES DE ALTA TENSIÓN,» UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, Ciudad Universitaria- El salvador, 2017.

- [9] T. Campoy, Metodología de la investigación científica, manual para la elaboración de tesis y trabajos de investigación, Asunción: Librería Cervantes, 2016.
- [10] J. A. Gil Pascual, Técnicas e instrumentos para la recogida de información, Madrid: UNED, 2011.
- [11] R. R. Rios, Metodología para la Investigación y redacción, Malaga: Servicios Académicos Intercontinentales S.L., 2017.
- [12] G. Lugo, «La importancia de los laboratorios,» *Construcción y Tecnología*, pp. 20-22, 2006.
- [13] G. Sánchez Bolívar, La relación teoría-práctica, otra faceta de la formación integral, Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- [14] FCyT UNC@, «LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN,» [En línea]. Available: <http://www.fctunca.edu.py/index.php/laboratorio>.
- [15] OMICRON, «Omicron,» [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/productos/cmc-356/>.
- [16] MEGGER, «FREJA546 SISTEMA MULTIFUNCIÓN PARA PRUEBAS DE RELÉS,» [En línea]. Available: <https://csa.megger.com/sistema-multiproposito-para-pruebas-de-reles-freja-1>.
- [17] SMC QUASAR, «QUASAR PRUEBA INTELIGENTE DE RELES,» [En línea]. Available: <https://smcint.com/es/product/quasar-prueba-inteligente-de-reles/>.
- [18] DOBLE, «F6150e Simulador de sistema de potencia,» [En línea]. Available: <https://www.doble.com/product/f6150e/?lang=es>.
- [19] PONOVO, «Unidad de Prueba de Relés de Protección (Prueba de Relés de Distancia),» [En línea]. Available: espanolponovo.com/relay-and-protection-

testing/protection-relay-testing-equipment-6i/pw460-protection-relay-test-set-is-the.html.

[20] EMIN, «Wuhan HT-802 Microcomputer Protection Relay Test Set (0.5 accuracy),» [En línea]. Available: <https://emin.com.mm/wuhanht-802-wuhan-ht-802-microcomputer-protection-relay-test-set-0-5-accuracy-myanmar-26334/pr.html>.

[21] DIGSILENT, «DIGSILENT I POWER SYSTEM SOLUTIONS,» [En línea]. Available: <https://www.digsilent.de/en/licence-and-installation-overview.html>.

[22] DIGSILENT, Power Factory Users Manual, Gomarigen: DIGSILENT, 2008.

[23] M. Zamora, A. Mazon, E. Fernandez, I. Albizo, E. Eguía y V. Valverde, Simulación de Sistemas Eléctricos, Madrid: Pearson, 2005.

[24] ETAP, «About ETAP,» [En línea]. Available: <https://etap.com/company/about-us>.

[25] ETAP, «System Modeling & Visualization,» [En línea]. Available: <https://etap.com/solutions/system-modeling-visualization>.

[26] ETAP, «Electrical Digital Twin Platform,» [En línea]. Available: <https://etap.com/solutions/system-modeling-visualization>.

[27] J. D. Carrillo , «MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA DE LA RED ELÉCTRICA DE TRANSPORTE DE GUATEMALA, UTILIZANDO SOFTWARE DE LIBRE ACCESO,» Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2009.

[28] EEP, «Electrical Engineering Portal,» [En línea]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/top-ten-courses-eeep-academy-electrical-engineers#matlab-simulink-course-power-system-simulations>.

[29] J. F. Piñeros, «Curso ATP - Guía básica,» Asociación de Ingenieros Electricistas Universidad de Antioquia, Antioquia.

[30] ABB, «REL670 - Transmission line distance protection,» [En línea]. Available: <https://www.hitachienergy.com/offering/product-and-system/substation-automation-protection-and-control/products/protection-and-control/line-distance-protection/rel670>.

[31] ABB, 670 Series. Engineering Manual, Hitachi Power Grids, 2021.