



Diseño e implementación de un módulo para validar el funcionamiento de protecciones eléctricas utilizando relés digitales SIPROTEC 7SJ62.

Intriago Moreno, Richier Anthony y Robayo Jácome, Eddy Joel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de unidad de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en
Electromecánica

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo MSc PhD

06 de septiembre del 2024

Latacunga.

Reporte de verificación de contenido



Plagiarism report

Tesis_Robayo_Intriago.pdf

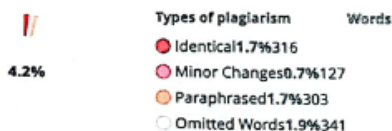
Scan details

Scan time:
March 6th, 2024 at 17:16 UTC

Total Pages:
73

Total Words:
18207

Plagiarism Detection



AI Content Detection



Alerts: (1)

Cross Language: Same Document Language

Submitted language and cross-language text are the same language. No credits were used.

2/5 Severity



Plagiarism Results: (37)

Componentes Simétricas - COMPONENTES SIMÉTRICAS Es un método des... 0.7%

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-pamplona/maquinas-electricas/componentes-simetr...>
Saltar al documento Universidad Instituto Libros Descubre Iniciar sesión Te damos la bienvenida a StudocuInicia sesión p...

Componentes-simetricas compress - Componentes Simétricas Maquinas ... 0.7%

<https://www.studocu.com/cl/document/universidad-de-antofagasta/medidas-electricas/componentes-simetri...>
Saltar al documento Universidad Instituto Libros Descubre Iniciar sesión Te damos la bienvenida a StudocuInicia sesión p...

(DOCX) Componentes Simetricos y Redes Se Secuencia - DOKUMEN.TIPS 0.6%

<https://dokumen.tips/documents/componentes-simetricos-y-redes-se-secuencia.html>

Unknown

x ...


Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo, MSc PhD
C. C.: 1803225414

Certified by


About this report
help.copyleaks.com

copyleaks.com


Escaneado con CamScanner



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un módulo para validar el funcionamiento de protecciones eléctricas utilizando relés digitales SIPROTEC 7sj62”** fue realizado por los señores **Intriago Moreno, Richier Anthony y Robayo Jácome, Eddy Joel**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

Ing. Ortiz Villalba, Diego Edmundo, MSc PhD

C. C.: 1803225414



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Intriago Moreno, Richier Anthony**, con cédula de ciudadanía n° 2200577795 y **Robayo Jácome, Eddy Joel**, con cédula de ciudadanía n° 1850071141, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un módulo para validar el funcionamiento de protecciones eléctricas utilizando relés digitales SIPROTEC 7sj62”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

Intriago Moreno, Richier Anthony
C.C.: 2200577795

Robayo Jácome, Eddy Joel
C.C.: 1850071141



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Intriago Moreno, Richier Anthony**, con cédula de ciudadanía n° 2200577795 y **Robayo Jácome, Eddy Joel**, con cédula de ciudadanía n° 1850071141, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un módulo para validar el funcionamiento de protecciones eléctricas utilizando relés digitales SIPROTEC 7sj62”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

Intriago Moreno, Richier Anthony
C.C.: 2200577795

Robayo Jácome, Eddy Joel
C.C.: 1850071141

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación está dedicado:

A mis padres, María y Sandy, les dedico este trabajo con profundo amor y gratitud. Su inquebrantable apoyo, sacrificios y constante aliento han sido el cimiento sobre el cual he construido cada paso de este arduo camino académico. Su ejemplo de perseverancia y amor incondicional ha sido mi mayor inspiración.

A mi querida abuelita, Magdalena, le dedico con todo mi corazón este trabajo de tesis. Su amor incondicional y sabiduría han sido faros que han iluminado mi camino a lo largo de esta travesía académica.

A los futuros estudiantes que se embarcarán en este fascinante viaje académico, les dedico este trabajo de tesis con la esperanza de que encuentren en él no solo conocimientos, sino también inspiración. Que cada página sea un recordatorio de que el aprendizaje es una travesía constante, llena de desafíos y logros. Que descubran en su camino la pasión por el conocimiento y la perseverancia para superar cualquier obstáculo.

Richier Intriago

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi Dios, que con su infinita bondad me ha permitido alcanzar este momento en mi vida.

A mis papas Fanny y Eddy, que con su sacrificio, entrega y amor me han dado todo lo que está a su alcance y aún más, para yo llegar a este momento, nunca baje los brazos porque ustedes fueron mi motor y mi inspiración para salir adelante, por todo lo que han hecho por mí, todos los logros se los dedico a ustedes.

A mi abuelita Vica, a mis hermanos y a mi familia querida, que siempre estuvieron preocupados por mí, siempre quisieron que me supere y siempre me brindaron su apoyo especialmente en los momentos más difíciles.

A mi novia Jenny, la cual hizo que crea en mí, quien me ha demostrado que puedo lograr todo lo que me proponga. Tu confianza y cariño han sido mi fuerza para alcanzar mis metas.

Joel Robayo

Agradecimiento

A mis queridos padres, María y Sandy, les expreso mi profundo agradecimiento por su amor incondicional y su constante aliento, los cuales han sido mi motivación en todo momento. Aprecio enormemente todos los sacrificios que han hecho, ya que, gracias a ellos, hoy puedo alcanzar otra meta significativa en mi vida.

A mi querida abuelita Magdalena, por siempre brindarme su apoyo y creer que lo iba a lograr. Gracias por muchas veces haber dejado de lado tus propias necesidades para ayudarme a culminar este logro en mi vida.

Al Dr. Diego Ortiz, gracias por su compromiso constante, por inspirarme a superar desafíos y por brindarme una guía valiosa en cada etapa de esta investigación. Su apoyo no solo ha sido académico, sino también motivacional, y estoy sinceramente agradecido por haber contado con su dirección experta.

Richier Intriago

Agradecimiento

Agradezco a mi Dios por ser el arquitecto de cada paso en mi vida, guiándome y permitiendo que todas las piezas se acomoden para alcanzar este logro.

A mis padres, cuyo inmenso esfuerzo, paciencia y apoyo han sido mi fortaleza. Por más difícil que sea la situación nunca me dejaron solo, aún en tiempos donde la situación era muy difícil para nosotros, nunca flaquearon esas ganas de apoyarme, infinitas gracias papas.

A mis hermanos y a mi familia querida, que siempre estuvieron para darme su respaldo y aliento inquebrantable en mi camino hacia esta meta.

A mi amada Jenny, quien fue la única que nunca dejó de creer en mí. Gracias por brindarme tu apoyo, tu amor incondicional y comprensión en los momentos de debilidad. Por darme ese aliento de seguir adelante y siempre quererme ver triunfar. Tu eres un gran partícipe de este logro en mi vida.

Agradezco especialmente al Doc. Diego Ortiz por su comprensión y apoyo durante este proceso. Gracias por compartir todos sus conocimientos, brindarme sus valiosos consejos y, sobre todo, por enseñarme a creer en mí mismo y aspirar a lo más alto. Su guía ha sido invaluable y estoy completamente agradecido por ello.

A mis queridos amigos Cristian, Kevin y Richier, quienes siempre han estado a mi lado en este transcurso académico. Tantas noches de esfuerzo compartido, entre risas y reflexiones, agradezco su compañía y su inquebrantable apoyo. Coincidir con personas como ustedes ha sido un verdadero regalo en mi vida.

Joel Robayo

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	14
Índice de tablas.....	16
Resumen.....	17
Abstrac	18
Capítulo I: Problemática	19
<i>Antecedentes investigativos</i>	19
<i>Planteamiento del problema</i>	21
<i>Justificación, importancia y alcance</i>	22
<i>Objetivos</i>	24
<i>Objetivo general</i>	24
<i>Objetivos específicos</i>	24

Capítulo II: Estado del arte	25
<i>Importancia de las protecciones eléctricas en la actualidad</i>	25
<i>Sistemas de protección eléctrica</i>	25
<i>Características generales de un sistema de protección</i>	26
<i>Relés de Protección</i>	28
<i>Clasificación de los relés según su principio de funcionamiento</i>	28
<i>Conceptos básicos de los relés digitales</i>	30
<i>Tipos de relés de protección en sistemas eléctricos de potencia</i>	33
<i>Tipos de falla en líneas de transmisión</i>	36
<i>Relé de sobrecorriente</i>	38
<i>Relé de sobrecorriente de fases 50/51P</i>	38
<i>Relé de sobrecorriente a tierra 50/51N</i>	39
<i>Relé de sobrecorriente de secuencia negativa</i>	40
<i>Estabilidad de frecuencia</i>	41
<i>Aumento y disminución súbita de carga en el sistema</i>	45
<i>Perturbaciones en generadores síncronos</i>	45
<i>Relés de frecuencia</i>	47
<i>RoCoF</i>	48
<i>Esquema de Desconexión Automática de Carga (EDAC)</i>	48
<i>Sistema inteligente para desprendimiento de carga</i>	48
<i>Oscilografías</i>	49

Capítulo III: Metodología.....	51
<i>A. Identificación de requisitos.....</i>	<i>51</i>
<i>B. Diseño.....</i>	<i>52</i>
<i>C. Construcción.....</i>	<i>52</i>
<i>D. Validación.....</i>	<i>52</i>
Capítulo IV: Caso de estudio.....	54
<i>Estudio de variables.....</i>	<i>54</i>
<i>Parámetros y configuraciones para sobrecorriente.....</i>	<i>55</i>
<i>Parámetros y configuraciones para frecuencia.....</i>	<i>59</i>
<i>Masking I/O.....</i>	<i>60</i>
<i>Configuración para TC's y TP's</i>	<i>62</i>
<i>Lógica de disparo</i>	<i>65</i>
<i>Recopilación de datos de los equipos del laboratorio utilizados.....</i>	<i>68</i>
Diseño	70
<i>Cálculos para protección de sobrecorriente.....</i>	<i>71</i>
<i>Cálculos para protección de subfrecuencia</i>	<i>77</i>
<i>Diseño del circuito de control y potencia</i>	<i>82</i>
<i>Diseño estructural del módulo.....</i>	<i>83</i>
<i>Dimensionamiento de los componentes del módulo.....</i>	<i>84</i>
Costos	86
Construcción del módulo.....	87

Validación	88
<i>Práctica de sobrecorriente.....</i>	89
<i>Práctica de subfrecuencia.....</i>	89
Capítulo V: Análisis de resultados	91
Módulo de protecciones eléctricas	91
Práctica sobre el módulo para sobrecorriente.....	92
Práctica de subfrecuencia para un generador síncrono.	97
<i>Análisis de la oscilografía tras la detección de la falla de subfrecuencia.</i>	100
Evaluación del grado de satisfacción.	104
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones.....	110
Conclusiones.....	110
Recomendaciones.....	111
Bibliografía	112
ANEXOS.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de protecciones eléctricas</i>	26
Figura 2 <i>Condiciones para la operación de los sistemas de protección</i>	27
Figura 3 <i>Señal senoidal</i>	30
Figura 4 <i>Función de muestreo</i>	31
Figura 5 <i>Señal muestreada</i>	31
Figura 6 <i>Circuito de muestreo y retención</i>	32
Figura 7 <i>Clasificación de tipos de fallas</i>	36
Figura 9 <i>Condiciones de desconexión de generadores</i>	46
Figura 8 <i>Esquema con relé de protección</i>	38
Figura 10 <i>Respuesta en frecuencia</i>	42
Figura 11 <i>Respuesta primaria de frecuencia después de una contingencia</i>	43
Figura 12 <i>Esquema de una oscilografía</i>	50
Figura 13 <i>Metodología para diseñar e implementar un módulo de protecciones eléctricas</i>	51
Figura 14 <i>Parámetros para protección de la unidad instantánea del relé SIPROTEC</i>	56
Figura 15 <i>Parámetros para protección de la unidad temporizada del relé SIPROTEC</i>	57
Figura 16 <i>Configuración de protección de frecuencia</i>	60
Figura 17 <i>Interfaz “Masking IO” de DIGSI</i>	61
Figura 18 <i>Ejemplo de conexiones para los TP’s y TC’s en un SEP</i>	65
Figura 19 <i>Diagrama lógico de la protección de sobreintensidad dependiente (S/I) para fases</i> . 66	
Figura 20 <i>Diagrama lógico para la protección de frecuencia</i>	68
Figura 21 <i>Motor y generador acoplados mecánicamente</i>	69
Figura 22 <i>SEP para práctica de sobrecorriente</i>	71
Figura 23 <i>Diagrama simplificado para la práctica de sobrecorriente</i>	73
Figura 24 <i>Dibujo 3D de la estructura del módulo</i>	83
Figura 25 <i>Diagrama secuencial de la etapa de construcción del módulo de protecciones</i>	87

Figura 26 <i>Módulo terminado de protecciones eléctricas.</i>	92
Figura 27 <i>Curva de activación del relé ante fallas de sobrecorriente</i>	93
Figura 28 <i>Curvas para coordinación de los 2 relés contra sobrecorriente</i>	95
Figura 29 <i>Perturbación de la frecuencia al sobrecargar el sistema</i>	101
Figura 30 <i>Primer estado de desconexión de carga</i>	102
Figura 31 <i>Segundo estado de desconexión de carga</i>	102
Figura 32 <i>Tercer estado de desconexión de carga</i>	103
Figura 33 <i>Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 1</i>	105
Figura 34 <i>Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 2</i>	107
Figura 35 <i>Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 3</i>	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tipos de relés</i>	33
Tabla 2 <i>Ajuste del relé 50/51P</i>	39
Tabla 3 <i>Parámetros para protección de sobrecorriente</i>	58
Tabla 4 <i>Conexión de los transformadores de potencial.</i>	64
Tabla 5 <i>Características del generador trifásico y motor de corriente continua.</i>	69
Tabla 6 <i>Potencia de cortocircuito de la external grid</i>	71
Tabla 7 <i>Datos de cada barra del SEP para la práctica de sobrecorriente</i>	74
Tabla 8 <i>Resultados para la protección de sobrecorriente</i>	75
Tabla 9 <i>Resultados calculados para coordinación de la protección de sobrecorriente</i>	77
Tabla 10 <i>Datos de placa del generador trifásico</i>	78
Tabla 11 <i>Cargas a ser desconectadas del sistema</i>	79
Tabla 12 <i>Escalones de subfrecuencia con su temporización</i>	81
Tabla 13 <i>Dimensionamiento de resistencias para sobrecorriente</i>	85
Tabla 14 <i>Dimensionamiento de resistencias para subfrecuencia</i>	85
Tabla 15 <i>Costo de los elementos para la construcción del módulo de protecciones</i>	86
Tabla 16 <i>Tiempos medidos y calculados para cada valor de cortocircuito</i>	94
Tabla 17 <i>Valores de relé principal de la práctica</i>	96
Tabla 18 <i>Valores de relé de respaldo de la práctica.</i>	96
Tabla 19 <i>Cargas trifásicas a desconectar del SEP</i>	98
Tabla 20 <i>Escalones de frecuencia medidos y calculados</i>	99
Tabla 21 <i>Eventos secuenciales de la práctica de protección de subfrecuencia</i>	100
Tabla 22 <i>Resultados de la pregunta 1</i>	104
Tabla 23 <i>Resultados de la pregunta 2</i>	106
Tabla 24 <i>Resultados de la pregunta 3</i>	108

Resumen

El presente trabajo de titulación se diseña e implementa un módulo de protecciones eléctricas mediante los relés SIPROTEC con el propósito de que los estudiantes lleven a cabo ejercicios prácticos utilizando las funciones de sobrecorriente y frecuencia ante fallas de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) simuladas aplicando los conocimientos recibidos en cátedra. Asimismo, se elaboran guías de laboratorio que detallan exhaustivamente el procedimiento para las prácticas correspondientes. Dentro del marco metodológico, se realiza una investigación de parámetros sobre el relé SIPROTEC y sobre las exigencias del módulo, luego en la etapa de diseño se elaboran los circuitos eléctricos que representan tanto el circuito de control para ambas prácticas como el circuito de potencia encargado de simular las fallas y sobrecargas en un SEP, también se presentan los planos mecánicos utilizados en los procesos de fabricación. Los diseños se emplean para la etapa de construcción mecánica y eléctrica, en donde se fabrica la parte estructural y los circuitos internos del módulo y finalmente se concluye con la validación de las prácticas. Dicho procedimiento fue aplicado para el laboratorio de máquinas eléctricas del campus general Guillermo Rodríguez Lara, de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga. Los resultados teóricos y prácticos son comparados para analizar el error en el tiempo de respuesta, y se aplica una encuesta de satisfacción la cual analizan el impacto de realizar las prácticas en una muestra de estudiantes.

Palabras clave: SEP, sobrecorriente, subfrecuencia, oscilografía, desconexión, relé, cortocircuito.

Abstrac

This project designs and implements an electrical protection module using SIPROTEC relays, enabling students to conduct practical exercises utilizing overcurrent and frequency functions in response to faults within a simulated Electric Power System, thereby applying their acquired classroom knowledge. Additionally, comprehensive laboratory guides are developed detailing the procedures for the respective practices. The methodological framework involves investigating parameters of the SIPROTEC relay and module requirements. Subsequently, during the design phase, electrical circuits representing both the control circuit for the practices and the power circuit responsible for simulating failures and overloads in an EPS are elaborated upon, along with mechanical drawings used in manufacturing processes. These designs facilitate the mechanical and electrical construction stage, where the structural components and internal circuits of the module are produced. Finally, the validation of the practices is conducted. This procedure was implemented at the electrical machines laboratory of the General Guillermo Rodriguez Lara campus of the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga. Theoretical and practical results are compared to analyze error in response time, and a satisfaction survey is administered to evaluate the internship's impact on a sample of students.

Key words: SEP, overcurrent, underfrequency, oscillography, disconnection, relay, short circuit.

Capítulo I

Problemática

Antecedentes investigativos

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) continuamente se enfrentan a una serie de desafíos debido a disturbios relacionados con fallas y perturbaciones en la red. Tras la evolución de la tecnología, los SEP modernos emplean protecciones eléctricas más eficientes y rápidas destinadas a prevenir fallos y realizar acciones para mitigar los efectos de una contingencia cuando estas se producen. (López, 2015)

El diseño de esquemas de protección eléctrica debe garantizar la fiabilidad en la ejecución de funciones críticas y prevenir operaciones incorrectas que puedan surgir durante fallos. Este esquema debe ser ágil en la detección y resolución de problemas, logrando una selectividad que permita aislar la falla sin afectar áreas no relacionadas. Además, debe priorizar la seguridad para evitar desconexiones indebidas debido a condiciones de fallo falsas. A su vez, debe demostrar sensibilidad para detectar tanto fallos temporales como permanentes, sin importar la distancia al interruptor principal del circuito. (Marín, 2003)

El dispositivo encargado de tomar decisiones sobre las acciones por la ocurrencia de una falla o una perturbación en el sistema es el llamado relé de protección, el elemento más importante dentro del equipo de protección, ya que su función principal radica en identificar, medir y actuar para aislar la parte del servicio o del sistema eléctrico afectado, evitando así posibles daños o interferencias en el funcionamiento efectivo del resto del sistema. (Barberán & Suárez, 2017)

Los relés de protección son dispositivos compactos que pueden ubicarse en cualquier punto del sistema de potencia. Son reconocidos como el núcleo central de un SEP, ya que reciben la información relevante, la procesan para tomar decisiones adecuadas y anticipan las

acciones necesarias para supervisar el funcionamiento de diversos elementos, como transformadores, generadores, líneas de transmisión, barras, entre otros. Estos relés se integran al sistema mediante equipos de medición como transformadores de corriente (TCs) y transformadores de potencial (TPs). (Rivera & Yauli, 2018)

En el amplio mercado de protecciones eléctricas, se destacan diversas marcas, entre las cuales Siemens ocupa un lugar prominente. Dentro de su extensa gama de productos, los equipos numéricos de protección multifuncional más destacados pertenecen a la línea SIPROTEC. Estos dispositivos ofrecen funciones estándar de protección para transformadores, generadores, líneas y motores. Además, cuentan con la capacidad de supervisar interruptores y controlar unidades de conmutación en barras, lo que facilita la implementación personalizada de funciones, incluida la automatización de equipos utilizados para controlar la energía eléctrica, también llamado a este conjunto de equipos de control "switchgear" (Mejía & Ollague, 2012).

Los equipos SIPROTEC 7SJ62 cuentan con su protección principal de sobrecorriente que dispone de dos escalones independientes de intensidad de tiempo definido y uno dependiente de tiempo inverso, además existen otras funciones de protección, como: protección de frecuencia, protección de sub y sobretensión, protección de carga desequilibrada, protección de sobrecarga con bloqueo de reconexión, supervisión del tiempo de arranque y protección de salto de carga como también una función de reconexión automática, con la que es posible efectuar diversos ciclos de interrupción en líneas aéreas. (Mejía & Ollague, 2012)

Dada la creciente importancia de adquirir un conocimiento integral en el área de protecciones eléctricas en el contexto de un mundo cada vez más interconectado y dependiente de la energía eléctrica, es crucial contar con una infraestructura académica que permita simular escenarios de fallas reales. Sin embargo, la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" sede Latacunga carece de la infraestructura necesaria para llevar a cabo este

tipo de simulaciones, lo que limita la comprensión profunda y necesaria de cómo actúan los elementos de protección en situaciones críticas.

En este sentido, el presente trabajo de titulación adquiere relevancia, ya que busca subsanar esta carencia al diseñar y desarrollar un módulo especializado en protecciones eléctricas. Este módulo permitirá a los estudiantes realizar pruebas y experimentos con condiciones de falla reales, lo que permitirá una comprensión y práctica de los principios y funcionamiento de los sistemas de protección eléctrica.

De esta manera, el trabajo de titulación no solo contribuirá al desarrollo académico de los estudiantes, sino que también fortalecerá la formación de ingenieros más capacitados y preparados para enfrentar los desafíos del mundo real en el ámbito de las protecciones eléctricas, asegurando así la seguridad, la fiabilidad y el funcionamiento eficiente de los sistemas eléctricos.

Planteamiento del problema

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga cuenta con varias carreras técnicas donde la práctica en el campo eléctrico es esencial. A pesar de la importancia de adquirir mayores destrezas en este campo, la institución carece de los recursos necesarios para llevar a cabo ejercicios prácticos relacionados con las protecciones eléctricas mediante el uso de relés digitales, donde se pueda recrear situaciones de falla para una línea de transmisión, generadores, transformadores, barras o motores.

Para subsanar esta limitación, se propone el presente proyecto, el cual tiene como objetivo la creación de un módulo didáctico de protecciones eléctricas utilizando los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens. Este módulo incluirá un banco para simular corrientes de falla y eventos de subfrecuencia, además brindará la facilidad de parametrizar los relés con el software DIGSI 4. De esta manera, se podrán llevar a cabo prácticas de protecciones de

manera eficiente, utilizando equipos más modernos que los disponibles actualmente. Se espera que este proyecto permita comprobar los resultados obtenidos a través de simulaciones y validarlos en la práctica mediante su implementación, y sea un complemento en la formación académica de los futuros profesionales de la institución.

Justificación, importancia y alcance

Justificación

El presente trabajo de titulación tiene como un objetivo principal el diseño y construcción de un módulo de protecciones eléctricas basado en los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens utilizando sus funciones de sobrecorriente (50/51) y subfrecuencia (81), para el desarrollo de prácticas de laboratorio, con el propósito de fortalecer la comprensión de los conocimientos impartidos en cátedra de protecciones eléctricas.

La principal razón para realizar este proyecto de titulación radica en que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga por el momento no cuenta con un módulo didáctico para la enseñanza de protecciones eléctricas, lo cual impide fortalecer y complementar el aprendizaje teórico impartido en la cátedra con experiencias prácticas integrales. Así mismo, existen relés de protección SIPROTEC 7SJ62 de marca Siemens donados por una empresa eléctrica, estos relés ofrecen diversas funciones, incluyendo protección para líneas, generadores, transformadores y motores, lo que podría beneficiar a una nueva generación de profesionales formados en la institución.

Por lo expuesto anteriormente es necesario realizar el diseño y construcción del módulo, ya que, posibilitará a los estudiantes a llevar a cabo ejercicios de laboratorio centrados en protecciones eléctricas, utilizando relés digitales. La capacitación en esta área del conocimiento proporcionará herramientas indispensables a los futuros profesionales para

mantenerse a la vanguardia en el uso adecuado de este equipo ampliamente utilizado dentro del sector eléctrico.

Asimismo, este módulo facilitará la validación práctica de los resultados obtenidos mediante simulaciones en software especializado ampliamente utilizado en la industria. Además, brindará la oportunidad de experimentar y comprender las implicaciones que pueden surgir de una coordinación y configuración inadecuadas de los sistemas de protección eléctrica. El conocimiento adquirido a través de estas experiencias permitirá a los estudiantes desarrollar habilidades críticas para subsanar desafíos reales en el campo de la ingeniería eléctrica.

Importancia

La importancia de esta iniciativa consiste en la creación de un módulo de protecciones eléctricas, con el cual los alumnos de la carrera de Ingeniería Electromecánica podrán desarrollar prácticas de laboratorio en el ámbito de las protecciones eléctricas. Esto supone un complemento a la formación académica al combinar la simulación con la implementación física, brindando una comprensión más profunda y amplia del funcionamiento de los esquemas de protecciones eléctricas utilizadas en la industria, así como analizar los efectos resultantes de una mala parametrización o actuación de las protecciones, facilitando la integración de los conceptos teóricos impartidos en cátedra.

Alcance

El alcance de este proyecto engloba la creación de un módulo de protecciones eléctricas fundamentado en los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens, con énfasis en las funciones de sobrecorriente (50/51) y subfrecuencia (81). Su propósito radica en facilitar la ejecución de prácticas de laboratorio en el área de las protecciones eléctricas.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un módulo de protecciones eléctricas basado en los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens utilizando las funciones de sobrecorriente (50/51) y subfrecuencia (81), para el desarrollo de prácticas de laboratorio de protecciones eléctricas con el propósito de fortalecer la comprensión integral de los conocimientos impartidos en catedra.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un módulo para realizar prácticas de laboratorio del curso de protecciones eléctricas utilizando los relés SIPROTEC 7SJ62 con el propósito de validar los conocimientos adquiridos en clases.
- Diseñar, simular y validar una práctica del funcionamiento del relé de frecuencia (81), en donde se apliquen los conceptos revisados en catedra, para fortalecer los conocimientos adquiridos con la implementación en el módulo de práctica de laboratorio.
- Diseñar, simular y validar una práctica del funcionamiento del relé de sobrecorriente (50/51), revisando los contenidos vistos en catedra, para fortalecer los conocimientos adquiridos con la implementación del módulo de prácticas de laboratorio.
- Elaborar manuales de laboratorio que donde se documente las prácticas ejecutadas, mediante el desarrollo de un instructivo detallado sobre cada actividad, para que los alumnos implementen de manera efectiva las configuraciones de protecciones eléctricas.

Capítulo II

Estado del arte

Importancia de las protecciones eléctricas en la actualidad

En un mundo cada vez más interconectado y dependiente de la energía eléctrica, la presencia de dispositivos de protección adecuados es crucial para prevenir y mitigar los riesgos asociados con fallas y situaciones inusuales en los sistemas eléctricos.

La importancia de las protecciones eléctricas se destaca como un componente fundamental para garantizar la seguridad, la fiabilidad y el funcionamiento eficiente de los sistemas eléctricos.

Su propósito principal es detectar y despejar las fallas ocurridas en el menor tiempo, y aislando la zona más pequeña posible. En un SEP conviven distintos entornos, llamados también contextos prácticos de estudio, donde cada uno tiene su propia escala de tiempo, diferentes problemas por resolver (o sub-problemas), y cuentan con la participación de los operadores del sistema y/o expertos en el campo específico (Nuñez, 2018).

Un sistema de protección correctamente coordinado es esencial para garantizar que una red eléctrica pueda operar dentro de los requisitos establecidos de seguridad para los equipos y el personal, así como para la integridad de la red en su conjunto.

Sistemas de protección eléctrica

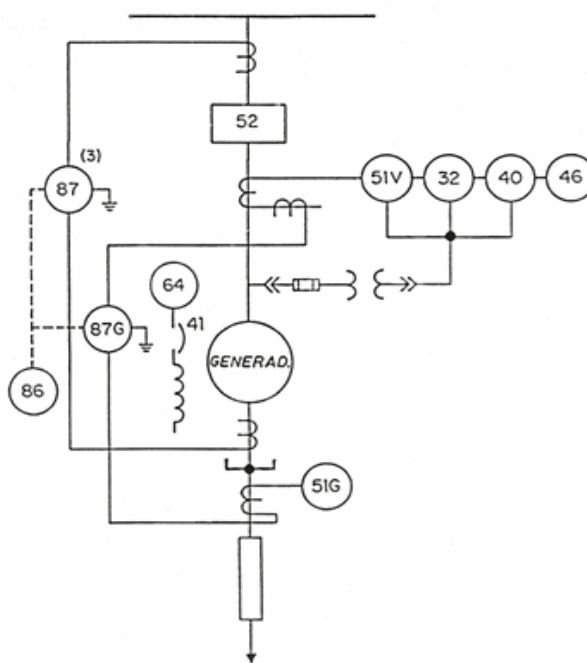
Cuando ocurre una falla, el sistema de protección debe tener la capacidad de identificar la falla de inmediato para aislar la parte afectada. Esto permite que el resto del sistema de energía continúe operando y reduce la posibilidad de daños en otros equipos.

La función principal del sistema de protección es desconectar de la red los equipos o partes del sistema que estén funcionando de forma anormal o presenten fallas como

cortocircuitos, aumento o disminución de voltaje, variación de frecuencia, entre otros fenómenos para asilarlos y continuar con el funcionamiento normal del resto del sistema. En la mayoría de los casos los fallos en la red eléctrica producen aumentos súbitos de la corriente, los cuales están siendo monitoreados por los instrumentos y equipos de protección, los cuales identifican esta anomalía y pueden llevar a la desconexión de uno o varios consumos del sistema eléctrico. (Arriagada, 1994).

Figura 1

Diagrama de protecciones eléctricas



Nota. Se presenta un circuito con diferentes relés de protección conformando un sistema de protección. Tomado de (Juan Gers, 2011).

Características generales de un sistema de protección.

Para que los equipos o elementos de protección dentro de un sistema eléctrico de potencia puedan responder adecuadamente ante diversos escenarios de falla que podrían

afectar la estabilidad del sistema, es imperativo cumplir con los siguientes requisitos en su operación. (Encalada & Tonato, 2023)

Figura 2

Condiciones para la operación de los sistemas de protección

Selectividad	<ul style="list-style-type: none"> •Es la capacidad del sistema de protección para detectar tanto las condiciones de acción inmediata como las que no necesitan un retardo de tiempo en su operación haciendo que la falla sea mínima
Selectividad cronométrica	<ul style="list-style-type: none"> •Se refiere a retrasar por un periodo de tiempo la actuación de las protecciones que se encuentren aguas arriba de la falla.
Selectividad amperimétrica	<ul style="list-style-type: none"> •En esta condición las protecciones actúan cuando la intensidad es mayor a la intensidad a la cual fue ajustada.
Selectividad lógica	<ul style="list-style-type: none"> •Este término hace referencia cuando se necesita un traspaso de la información entre los relés de protección de los interruptores, estos entran a actuar cuando la corriente es mayor al umbral de funcionamiento
Rapidez	<ul style="list-style-type: none"> •Se refiere a cuando el sistema de protección debe actuar en el menor tiempo posible cuando se produzca una falla, para así poder reducir el daño al mínimo posible para poder estabilizar el sistema
Sensibilidad	<ul style="list-style-type: none"> •El sistema de protección debe revisar de forma continua si este está en óptimo funcionamiento tal y como a sido programado o ajustado para evitar posibles fallos.
Confiabilidad	<ul style="list-style-type: none"> •Es un requisito fundamental que se debe presentar en los sistemas de protección, para garantizar la actuación de los diferentes elementos de protección.

Nota. Se describen los requerimientos que deben cumplir los sistemas de protección para actuar durante fallos del sistema. Tomado de (Encalada & Tonato, 2023)

Relés de Protección

Un relé de protección es un dispositivo que identifica cualquier alteración en la señal que recibe, comúnmente proveniente de una fuente de corriente o voltaje. Cuando la magnitud de la señal de entrada excede un valor predeterminado, el relé ejecutará una acción específica, generalmente para abrir o cerrar contactos eléctricos e iniciar alguna operación adicional (Juan Gers, 2011)

Existen diversos tipos de relés de protección, cada uno diseñado para detectar y responder ante un tipo específico de falla. Los relés de protección, al igual que otros dispositivos, han experimentado una notable evolución y mejoramiento a lo largo del tiempo, lo que ha resultado en una variedad de tipos disponibles según su tecnología. Es importante explorar estas distintas categorías para comprender mejor sus capacidades y aplicaciones específicas en los sistemas eléctricos modernos.

Clasificación de los relés según su principio de funcionamiento

Relés Electromecánicos

Estos dispositivos están fabricados con una combinación de componentes eléctricos, magnéticos y mecánicos, que incluyen una bobina de activación y múltiples contactos. Son altamente duraderos y confiables, y se les llama relés electromagnéticos por el uso de componentes magnéticos. Sus características de diseño se pueden dividir en tres categorías, mencionadas a continuación (Argüello & Carchipulla, 2015, p.39).

- Relevos de atracción
- Relés con bobinas móviles
- Relés de inducción

Relés de Estado Sólido

Un relé de estado sólido es una unidad donde no hay ninguna pieza móvil y su funcionamiento se logra mediante componentes electrónicos, de estado sólido, magnéticos u otros que no implican movimiento mecánico.

Una limitación significativa de los relés estáticos es su susceptibilidad a transitorios, incluso de pequeña magnitud, lo que requiere precauciones adicionales para proteger la instalación. Además, los diseños estáticos son más sensibles a la temperatura y, por lo tanto, operan dentro de un rango de temperatura más estrecho en comparación con los dispositivos electromagnéticos. (Anderson, 1998)

Relés IED's (Intelligent Electronic Device)

En la actualidad, los relés IED's han dominado completamente el mercado gracias a sus características destacadas, como su diseño compacto y amplias capacidades en protección, control, monitoreo y medición, todo ello basado en tecnología de microprocesadores. Su método de detección de fallas ha demostrado ser más confiable y rápido en comparación con los relés electromecánicos y de estado sólido.

Estos dispositivos son capaces de reportar eventos en un tiempo máximo de un segundo desde su detección hasta que la falla es identificada en el centro de control. Además, almacenan datos en una memoria que permanece en el dispositivo incluso en caso de pérdida de alimentación.

Cuentan con funciones de auto chequeo y diagnóstico, así como con contactos para activar alarmas externas en caso de falla interna, junto con indicadores luminosos en el propio relé. Aunque el costo de implementar estos dispositivos en un sistema de protección puede ser mayor, se compensa significativamente debido a la amplia gama de funciones de protección, medición, control, monitoreo y comunicación que ofrecen en un solo dispositivo (Argüello & Carchipulla, 2015, p.40).

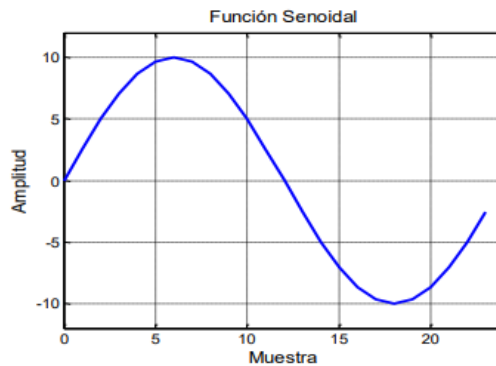
Conceptos básicos de los relés digitales

Muestreo

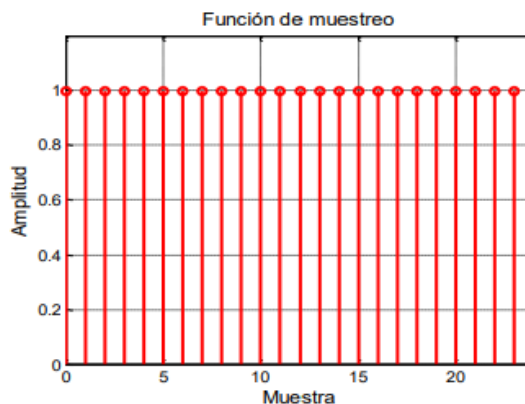
El proceso de muestreo de señales en los relés digitales contiene la transformación de una señal de entrada en el dominio del tiempo continuo al tiempo discreto. Matemáticamente, esto puede entenderse como la convolución de dos señales continuas en el tiempo. Por ejemplo, consideremos una señal senoidal de 60 Hz que es continua en el tiempo como en la Figura 2, y una señal con una frecuencia de muestreo de 1440 Hz, representada en la Figura 3. La convolución de estas dos señales genera el resultado del muestreo, que se observa en la Figura 4 (Gutierrez, 2016).

Figura 3

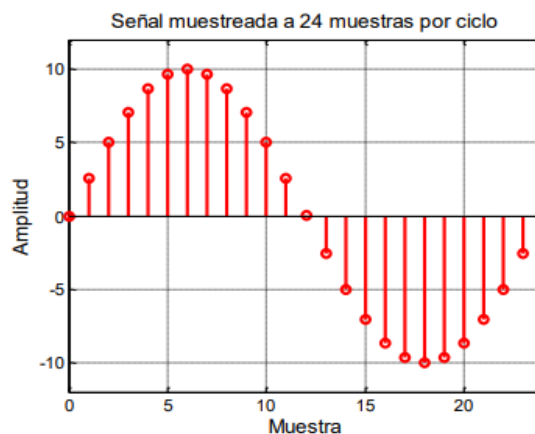
Señal senoidal



Nota. En la figura se aprecia una señal senoidal de 60 Hz. Tomado de (Gutierrez, 2016).

Figura 4*Función de muestreo*

Nota. Se observar una señal de muestreo de 1440 Hz. Tomado de (Gutierrez, 2016).

Figura 5*Señal muestreada*

Nota. Se aprecia la señal muestreada por la convolución de las señales. Tomado de (Gutierrez, 2016).

Aliasing

Quando se trabaja con una señal muestreada cuya frecuencia no se conoce, existe el riesgo de que ocurra el fenómeno de Aliasing. En términos generales, este fenómeno se

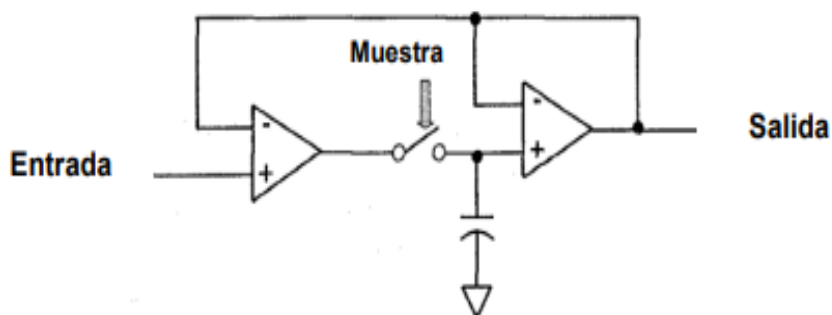
manifiesta como una distorsión en el muestreo debido a la incapacidad de reproducir con precisión una señal de entrada, especialmente cuando contiene componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia principal. Por lo tanto, la utilización de filtros pasa bajos es crucial para evitar este efecto no deseado (Gutierrez, 2016).

Muestro y retención (S/H)

Para mantener constante una señal muestreada que varía con el tiempo, se requiere de un circuito de muestreo y retención, el cual se representa en la Figura 6.

Figura 6

Circuito de muestreo y retención



Nota. La figura representa un circuito de muestreo y retención. Tomado de (Gutierrez, 2016).

La mayoría de los relés numéricos necesitan datos como la relación temporal y la señal de entrada para llevar a cabo sus funciones de protección y control. (Gutierrez, 2016).

Microprocesador y circuitos periféricos

En cualquier relé de protección microprocesado, el control está a cargo del microprocesador. Este microprocesador gestiona todos los circuitos de control, cálculo, autoverificación y funciones de comunicación asociadas con sus periféricos. Algunas unidades utilizan Procesadores Digitales de Señales (DSP) para mejorar el rendimiento en cálculos

cuando es necesario. Un DSP se considera como un coprocesador numérico que trabaja en conjunto con el microprocesador principal y está diseñado específicamente para realizar cálculos de alta velocidad que superan el rendimiento del microprocesador general (Gutierrez, 2016).

Los relés de protección numérica actuales tienen la capacidad de realizar autopruebas para evaluar la circuitería interna y la operación del dispositivo. Además, muchos dispositivos cuentan con herramientas auxiliares para identificar el tipo y la gravedad de las fallas en el sistema, lo que permite generar alarmas y retirar de servicio el equipo involucrado. Una función importante del software del microprocesador es la retención de datos, que se lleva a cabo en una memoria no volátil. Con los avances tecnológicos recientes y la incorporación de relés de protección basados en microprocesadores, la disponibilidad de almacenamiento ha aumentado, lo que ha llevado a sistemas de software más complejos.

Tipos de relés de protección en sistemas eléctricos de potencia

Tabla 1

Tipos de relés

ANSI/ IEEE	Nombre	Función
50	Sobrecorriente instantánea	Detecta la corriente que fluye a través de un circuito eléctrico. Cuando la corriente supera un valor preestablecido, el relé activa su función de protección.
51	Sobrecorriente de tiempo dependiente	Opera monitoreando la corriente que fluye a través de un circuito eléctrico durante un período de tiempo determinado. Este tipo de relé está diseñado para proteger contra condiciones de sobrecorriente que persisten durante un cierto tiempo.

ANSI/ IEEE	Nombre	Función
50 N	Sobrecorriente de neutra instantánea	Monitorea la corriente que fluye a través del conductor neutro de un sistema eléctrico. Cuando la corriente que circula supera un umbral preestablecido, el relé activa su función de protección.
51 N	Sobrecorriente de neutro temporizada	Detecta durante un período de tiempo determinado, no responde de inmediato ante un aumento repentino de corriente en el neutro.
67	Sobrecorriente de fase direccional	Monitorea la corriente que fluye en una fase específica de un sistema eléctrico y determinando su dirección de flujo. Este tipo de relé es capaz de distinguir entre corrientes que fluyen en la dirección de carga normal y corrientes que fluyen en dirección inversa.
67N	Sobrecorriente de tierra direccional	Opera monitoreando la corriente que fluye a través del conductor de tierra y determinando su dirección de flujo.
87	Sobrecorriente diferencial	Este tipo de relé es esencialmente un dispositivo de protección diferencial que monitorea la diferencia entre las corrientes de entrada y salida de un equipo eléctrico.
59	Sobretensión	Responde a niveles altos de voltaje en un sistema eléctrico.
27	Subtensión	Responde a niveles bajos de voltaje en un sistema eléctrico.
21	Impedancia de fase – distancia	Evalúa la impedancia de la línea eléctrica y determinando la distancia a la falla basada en esta impedancia medida.

ANSI/ IEEE	Nombre	Función
21N ó 21G	Impedancia de tierra – distancia	Evalúa la impedancia de la tierra y determina la distancia a la falla basada en esta impedancia medida.
81	Subfrecuencia	Responde a niveles por debajo de lo permisible en frecuencia en un sistema eléctrico.
81	Sobrefrecuencia	Responde a niveles por encima de lo permisible en frecuencia en un sistema eléctrico.
81	Deriva de frecuencia	Protege el sistema de eventos anormales relacionados con la frecuencia, como variaciones extremas que podrían indicar un desequilibrio en la generación y consumo de energía.
40	Pérdida de excitación	Responde a la pérdida de excitación en los generadores síncronos.
24	Sobreexcitación – Volts por Hertz	Opera cuando la relación entre el voltaje y la frecuencia de la corriente alterna (CA) excede ciertos límites seguros.
78	Pérdida de paso	Detecta la pérdida de sincronismo entre dos generadores o entre un generador y la red eléctrica.
79	Reconexión automática	Automatiza el restablecimiento de la energía después de una interrupción.
25	Control de sincronismo	Garantiza el adecuado sincronismo entre generadores antes de conectarlos en paralelo.
60	Supervisión de pérdida de potencial	Monitorea la continuidad del suministro eléctrico y detectar pérdidas de potencial en líneas de transmisión o equipos.

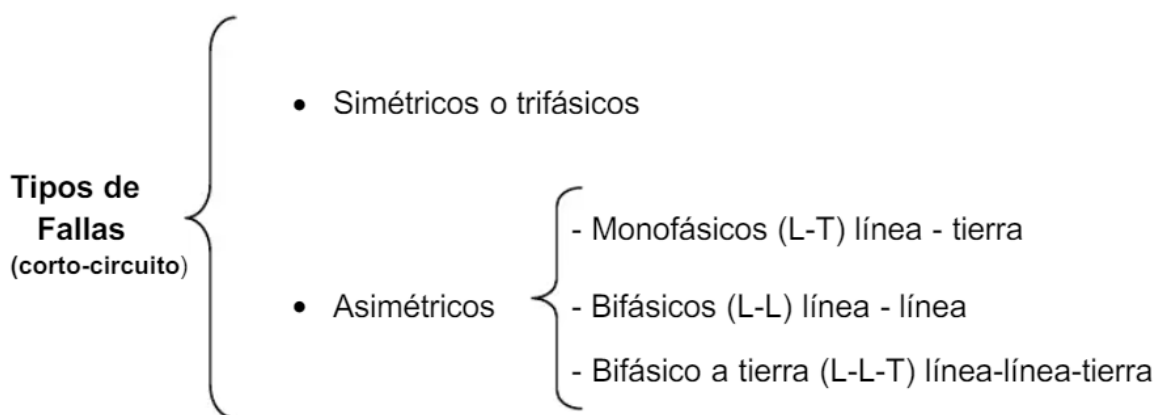
Nota. La tabla muestra las designaciones de los relés más usados según la norma ANSI/IEEE e IEC.

Tipos de falla en líneas de transmisión

Una falla en un circuito es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente (Jhon Grainger, 1996). La mayoría de las fallas en los sistemas de energía son de naturaleza asimétrica y pueden incluir cortocircuitos asimétricos, fallas asimétricas a través de impedancias o la apertura de conductores.

Figura 7

Clasificación de tipos de fallas



Nota. Se expone la clasificación de los tipos de fallas en líneas de transmisión. Tomado de (Alderete, s.f.).

Componentes simétricos en fasores

Una de las herramientas más efectivas para analizar circuitos polifásicos desequilibrados es el método de las componentes simétricas, desarrollado por Fortescue. Este método demuestra que un sistema desequilibrado de n fasores puede descomponerse en " n " conjuntos de fasores balanceados llamados componentes simétricas de los fasores originales. Los fasores en cada grupo tienen igual magnitud y los ángulos entre fasores vecinos en un grupo son iguales.

En un sistema trifásico típicamente equilibrado, las condiciones desequilibradas causadas por una falla suelen generar corrientes y voltajes desequilibrados en cada una de las tres fases. Si las corrientes y voltajes están relacionados por impedancias constantes, el sistema se considera lineal y se puede aplicar el principio de superposición. La respuesta en voltaje del sistema lineal a las corrientes desequilibradas se puede calcular al analizar las respuestas individuales de los elementos a las componentes simétricas de las corrientes. Los elementos relevantes del sistema incluyen máquinas, transformadores, líneas de transmisión y cargas conectadas en configuraciones en estrella o delta.

Cálculo de corriente simétrica de cortocircuito

La corriente de cortocircuito es la corriente máxima que puede soportar un circuito eléctrico cuando se conectan dos puntos de la red con una impedancia muy baja.

“La magnitud simétrica de la corriente de falla se determina en relación con los componentes presentes en la trayectoria del cortocircuito, y se expresa mediante la ley de Ohm” (Gonzalés, 2020).

La expresión que determina la corriente de cortocircuito es la siguiente

$$I_{sc_c} = \frac{V_L}{\sqrt{3} (Z_T)} \quad (1)$$

Donde:

I_{sc_c} : Corriente de cortocircuito simétrica trifásica

V_L : Tensión de línea

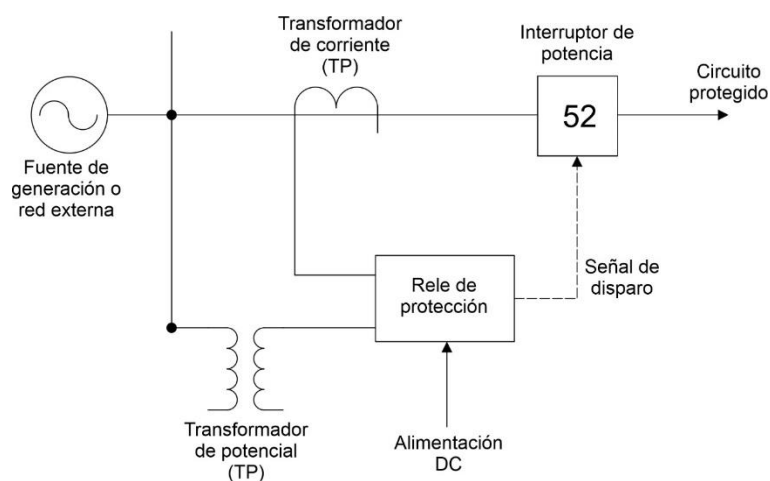
Z_T : Impedancia total del sistema

Relé de sobrecorriente

Según el autor (Cabrera, 2021), “los relés de protección de sobrecorriente son elementos capaces de detectar fallas en el sistema que produzcan corrientes excesivas y poder desconectarla acorde a los ajustes realizados”. Estos elementos de protección reciben una o más señales de entrada, las compara con ciertos parámetros y si la misma supera los valores ajustados envía una señal de disparo al elemento de desconexión para que desconecte una parte del sistema. Los elementos de comparación y actuación son principalmente electromecánicos o electrónicos. En la Figura 8 se presenta un esquema básico de un sistema de protección con relé de sobrecorriente.

Figura 8

Esquema con relé de protección



Nota. En la figura observa un esquema básico de un sistema de protección mediante un relé de protección de sobrecorriente. Tomado de (Cabrera, 2021)

Relé de sobrecorriente de fases 50/51P

El relé de sobrecorriente 50/51P de fases es usado como respaldo de la protección diferencial, también se usa para proteger al transformador contra fallas externas no despejadas, las mismas que pueden provocar sobrecalentamiento y causar daños de aislamiento. Por lo

general el relé temporizado 51 se ajusta con un valor de corriente de arranque de 125% a 150%, en donde se considera la condición de sobrecarga y la corriente de magnetización Inrush. Este tipo de relé se lo recomienda coordinar aguas abajo del transformador para evitar que se active innecesariamente. (Argüello & Carchipulla, 2015)

Tabla 2

Ajuste del relé 50/51P

Ajustes de corriente	
Sobrecargas temporales en el alimentador	15%
Error de los transformadores de corriente	7%
Error del relé	4%
Conexiones	7%
Tolerancia de cálculo	8%
Total	41%→50%

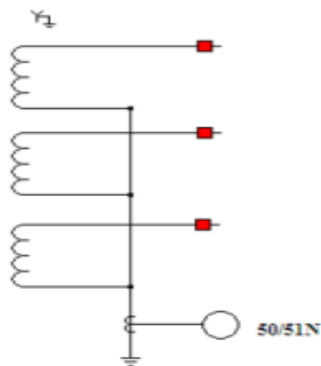
Nota. Porcentajes para el ajuste de corriente de un relé de sobrecarga de fases 50/51P para un sistema de 22.9 kV. Tomado de (Saavedra, 2021)

Relé de sobrecorriente a tierra 50/51N

Este tipo de relé de sobrecorriente a tierra 50/51N se basa en medir las corrientes de secuencia cero en el neutro del transformador, las mismas que aparecen cuando se produce un fallo a tierra en los devanados del transformador, este relé se debe conectar en el devanado del transformador en Y. (Argüello & Carchipulla, 2015)

Figura 6

Relé de sobrecorriente a tierra 50/51 N.



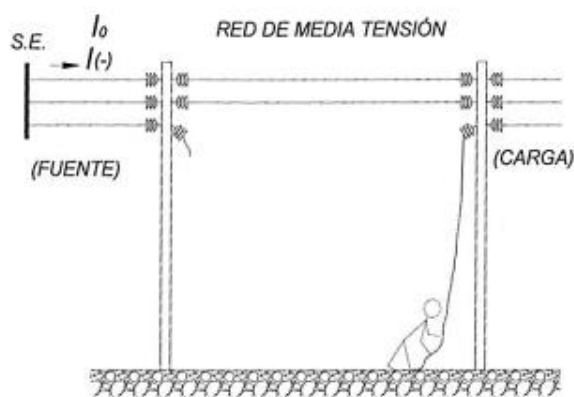
Nota. En la figura se observa el esquema de conexión del relé de sobrecorriente a tierra el cual está conectado en estrella. Tomado de (Argüello & Carchipulla, 2015)

Relé de sobrecorriente de secuencia negativa

Para poder comprender la aplicación del relé de sobrecorriente de secuencia negativa se analiza la Figura 7.

Figura 7

Relé de sobrecorriente de secuencia negativa ante ruptura de un conductor



Nota. Ejemplo en donde actuaría el relé de sobrecorriente de secuencia negativa ante la ruptura de un conductor. Tomado de (Saavedra, 2021)

Este relé se activará si ocurre un fallo producido por una línea abierta, ya que si el conductor se rompe y llega a caer al piso existirá una sobrecorriente, y a su vez se producirá un desbalance del sistema existiendo una corriente de secuencia negativa alta, es ahí donde el relé actuará para desactivar el circuito afectado.

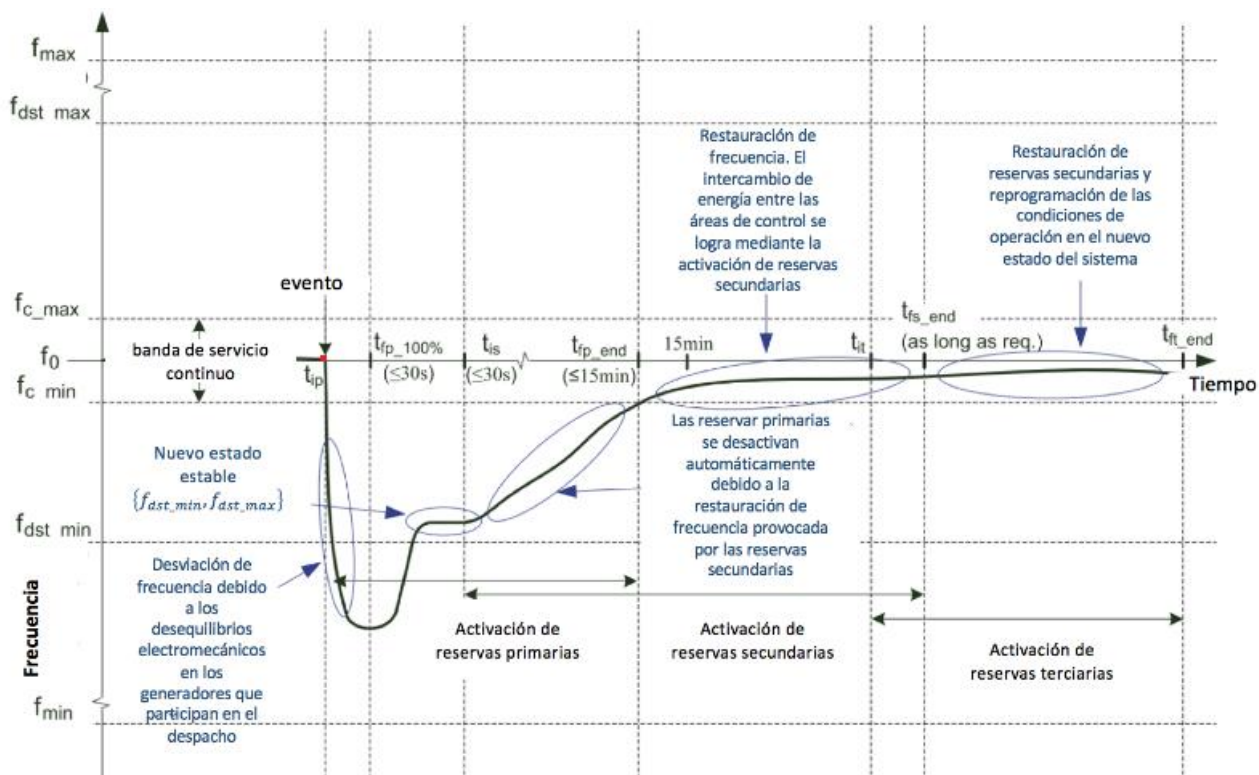
Estabilidad de frecuencia

La estabilidad de frecuencia en un sistema eléctrico de potencia se relaciona con la capacidad del sistema para mantener un valor de frecuencia constante durante el tiempo frente a perturbaciones. Este equilibrio se mantiene cuando la generación es igual a la demanda más las pérdidas del sistema. Las causas comunes de la falta de estabilidad incluyen variaciones repentinas de carga y la desconexión de generadores. Estos eventos pueden tener consecuencias significativas, como la desconexión de cargas o generadores, destacando la importancia de tratar y mitigar las perturbaciones para mantener la estabilidad del sistema eléctrico (Hatzargyriou y otros, 2021)

En situaciones de desbalance de potencia causado por contingencias, los generadores restantes participan en el despacho y convierten su energía cinética rotacional en energía eléctrica, conocido como respuesta inercial. Este proceso desacelera los generadores, resultando en una disminución de la frecuencia del sistema. La respuesta inercial brinda tiempo para que los generadores detecten cambios en la frecuencia e inicien el control primario de frecuencia mediante reguladores de velocidad. A medida que el control primario actúa, el desequilibrio neto converge a cero y la frecuencia deja de disminuir, evitando la activación de esquemas de desconexión automáticos de carga (EDAC). En los siguientes segundos y minutos, operadores de la red envían señales de control hacia las unidades de generación para incrementar su potencia y restablecer la frecuencia a su valor nominal (60 Hz), activando así las reservas secundarias y terciarias (Denholm et al., 2020, pp. 4-10).

Figura 9

Respuesta en frecuencia



Nota. Se presenta la estabilización de frecuencia después de una contingencia, así como la respuesta primaria, secundaria y terciaria en frecuencia durante el tiempo. Tomado de (Ortiz, 2023).

Respuesta primaria en frecuencia. El control primario en frecuencia (RPF) se refiere a la acción automática realizada por los reguladores de velocidad de los generadores para corregir los desequilibrios instantáneos entre la generación y la carga. Su objetivo principal es estabilizar la frecuencia del sistema en un valor cercano al nominal cuando hay un desequilibrio entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Este control opera dentro de un intervalo de tiempo que varía de 2 a 30 segundos (según el tipo de generador) después de que ocurra una falla (MÖLLER, 2012, p.7).

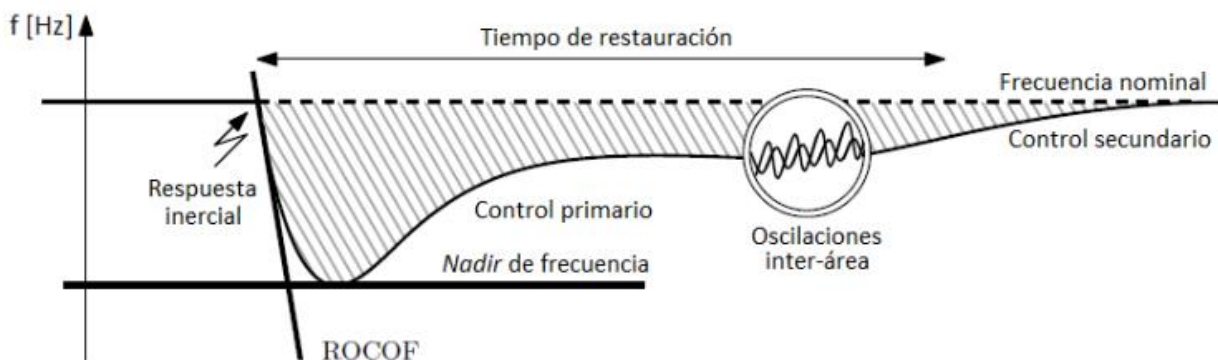
Respuesta secundaria en frecuencia. Es el control de frecuencia que tiene como objetivo principal compensar el error de frecuencia en estado estacionario después de la intervención del control primario, y también es el que restituye las reservas primarias. Este mecanismo actúa posteriormente al control primario debido a su tiempo de respuesta más extenso. Su acción abarca un período que va desde unos pocos segundos (alrededor de 30 segundos) hasta varios minutos después de que ocurra una contingencia. (MÖLLER, 2012, p.7).

Respuesta terciaria de frecuencia. Actúa a partir de 10 minutos de la contingencia, en el ámbito de un sistema eléctrico extenso, buscando un reparto de cargas optimizado que asegure suficientes reservas de energía (Larrea, 2015, p. 10).

Frecuencia nadir. La frecuencia Nadir (f_{NAD}) es el valor mínimo de frecuencia que el sistema alcanza luego de una contingencia. Si este valor de la frecuencia excede cierto umbral, los EDAC se activan con el propósito de recuperar el balance de carga, y evitar así la posibilidad de un “blackout” (Ortiz, 2023, p. 13).

Figura 10

Respuesta primaria de frecuencia después de una contingencia



Nota. En la figura se representa la respuesta inercial, respuesta primaria en frecuencia, respuesta secundaria en frecuencia, también la frecuencia nadir y el RoCoF. Tomado de (Vega, 2021, p.7)

Cuando aparece una deficiencia en el sistema eléctrico, como la desconexión de un generador, variación de la carga o una falla, se produce un desequilibrio entre la potencia generada y consumida, por ello la potencia P_M y P_E no son iguales, por eso se produce una potencia de aceleración o desaceleración P_A , entonces:

$$P_A = P_M - P_E \quad (2)$$

Donde:

P_A : es la potencia de aceleración o desaceleración, es decir la sobrecarga en MW desequilibrio que existe en el sistema.

P_M : es la potencia mecánica en MW.

P_E : es la potencia eléctrica en MW.

Para analizar la estabilidad del sistema eléctrico con respecto a la frecuencia, se empieza por el análisis de estabilidad de la máquina síncrona, en donde se puede emplear la fórmula que define el RoCoF que viene dada por:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_0}{2GH} \left[\frac{Hz}{s} \right] \quad (3)$$

G: es el potencial nominal (base) de la máquina bajo estudio en MVA

H: es la constante de inercia en MJ/MVA o MW*sec/MVA.

δ : es el ángulo de torque de la máquina síncrona

f_0 : frecuencia nominal en Hz

P_A : potencia de aceleración o desaceleración en MW

Aumento y disminución súbita de carga en el sistema

El aumento y la disminución súbita de carga en el sistema eléctrico pueden desencadenar una serie de desafíos y situaciones críticas que requieren una protección adecuada para garantizar la estabilidad y la integridad del sistema. Uno de estos fenómenos es la subfrecuencia, se produce cuando la demanda de potencia activa es mayor que la que puede entregar el SEP o cuando el regulador automático de velocidad tiene un mal funcionamiento. Por otra parte, las fallas de sobrefrecuencia son ocasionadas mayormente por desconexiones de carga en redes aisladas y por falla en el regulador automático de velocidad. Generalmente se requiere la protección de subfrecuencia para generadores que trabajen en una red aislada, ya que esta falla es más probable. (SIPROTEC, 2004, p. 177).

Cuando un SEP experimenta un aumento de carga se produce el mismo efecto que cuando se desconecta una unidad de generación, ya que se incrementa el desbalance del SEP, produciendo disminución de la velocidad y de la frecuencia. La respuesta inercial ayuda a que la frecuencia no disminuya tan rápido, dando tiempo para que se detecten cambios en la frecuencia y se active la RPF mediante los reguladores automáticos de velocidad, evitando la activación de los EDAC, luego se activan las respuestas secundaria y terciaria corrigiendo el error en estado estacionario. En otro caso menos frecuente cuando se tiene una disminución súbita de demanda en el sistema se provoca en el generador una aceleración, lo que aumenta rápidamente la frecuencia del sistema, ocasionando graves oscilaciones o embalamiento de las unidades de generación (Denholm et al., 2020, pp. 4-10).

Perturbaciones en generadores síncronos

La disminución de la frecuencia puede deberse a incrementos en la demanda o problemas en la regulación, siendo crucial para generadores en redes aisladas. La protección

contra este evento permite separar el generador de la red. Por otro lado, el aumento de frecuencia, causado por reducciones de carga o fallos en la regulación, puede llevar a riesgos como la autoexcitación en máquinas sobre líneas largas en vacío.

Según los autores (Triviño & Burgos, 2017), “una falla o perturbación se define como la alteración no deseada de las condiciones de funcionamiento normal de un SEP”, en los generadores pueden ocurrir estas perturbaciones de tipo eléctrico o mecánico las cuales pueden ser provocadas por factores atmosféricos, envejecimiento de los elementos, factores humanos, animales y vegetación, etc. Lo cual puede afectar la estabilidad propia del generador como la del sistema.

Desconexión de generadores

El sobrecalentamiento en el rotor del generador síncrono producido por una doble falla a tierra puede producir la aparición de vibraciones siendo una situación grave que puede precisar la desconexión de la unidad generadora del sistema eléctrico. Pero más allá de estas perturbaciones, existen condiciones de acuerdo al código de red en donde se menciona lo siguiente (Triviño & Burgos, 2017):

Figura 11

Condiciones de desconexión de generadores

Variación de frecuencia en condiciones normales.	•Para que no se produzca la desconexión de la unidad generadora este debe funcionar entre 49,95 Hz a 50,05 Hz
Aumento o caída de la frecuencia del sistema.	•Bajo estas condiciones la frecuencia del sistema puede aumentar a 50,5 Hz y por el contrario caer a 48,5 Hz y las unidades generadoras deben seguir funcionando.
Bajo condiciones extremas de falla del sistema.	•Bajo estas condiciones si las unidades generadoras sobrepasan los umbrales de $\leq 48,5 \text{ Hz}$ o $\geq 50,5 \text{ Hz}$ deben necesariamente por seguridad desconectarse.

Nota. Se presentan las condiciones de desconexión de los generadores síncronos frente a fallas o perturbaciones del sistema. Tomado de (Triviño & Burgos, 2017)

Relés de frecuencia

El relé para protección de frecuencia es un dispositivo empleado en un SEP para monitorear y proteger los equipos, manteniendo la estabilidad del sistema contra variaciones anómalas en la frecuencia. El propósito del relé de frecuencia está especialmente orientado hacia la aplicación en esquemas de desconexión de carga, lo que implica establecer puntos límites de operación de frecuencia y tiempo (Rasgado, 2004).

La protección de frecuencia tiene como objetivo detectar sobrefrecuencias o subfrecuencias en la red o en máquinas eléctricas, midiendo y controlando la frecuencia del SEP para poder estabilizarlo. Si la frecuencia se encuentra fuera del rango permitido, el relé responde mediante el envío de señales a equipos que permitan efectuar las operaciones de desconexión correspondientes como por ejemplo reducción de carga o separación del generador de la red para ayudar a disminuir la perturbación en el sistema (SIPROTEC, 2004, p. 177).

RoCoF

Según López (2015) “la tasa de cambio de frecuencia o RoCoF (rate of change of frequency), es la variación de frecuencia del sistema o de una máquina debido a perturbaciones entre generación-carga”. Es decir, la rapidez con la que cambia el valor de frecuencia de un sistema debido a desbalances en la ecuación de equilibrio, se puede cuantificar mediante la Ecuación 3.

El RoCoF está fuertemente relacionado con la inercia del sistema ya que son variables inversamente proporcionales, es decir un sistema de generación con mayor inercia puede experimentar menor variación de frecuencia, lo que resulta en una mejor estabilidad a perturbaciones de este tipo.

Esquema de Desconexión Automática de Carga (EDAC)

Estos sistemas tienen como finalidad desconectar carga, para ayudar a que el desbalance producido entre carga y generación no sea tan severo evitando caídas más rápidas de frecuencia, sin embargo, si la caída de frecuencia es muy pronunciada, podría provocar una reacción en cadena que podría incluso llevar a un colapso del sistema, provocando graves consecuencias socio-económicas. Estos esquemas suelen estar diseñados con lógica de control sofisticada y se implementan con relés y dispositivos de protección para garantizar una respuesta rápida y precisa ante condiciones anormales en el sistema eléctrico (Larrea, 2015, p. 13).

Sistema inteligente para desprendimiento de carga

El desprendimiento de carga inteligente significa monitorear y tomar decisiones basadas en el estado del modelo del sistema, el valor de la operación, la criticidad de los procesos en ejecución y el impacto ambiental. El desprendimiento de carga y la reducción de la demanda son fundamentales para preservar las cargas esenciales y evitar interrupciones generalizadas

del sistema. Esta estrategia de equilibrio de energía debe basarse en un sistema integrado de respuesta rápida que considere la dinámica del proceso y del sistema de energía. (Shokoooh & Dai, 2005)

Un enfoque eficaz del desprendimiento de carga mediante un sistema inteligente requiere una comprensión integral de la dinámica del sistema de energía y las limitaciones del proceso, combinada con el conocimiento de las perturbaciones del sistema. Este tipo de sistema inteligente debe contar con los siguientes parámetros:

- Condiciones de funcionamiento previas a la perturbación
- Condiciones de funcionamiento posteriores a la perturbación
- Naturaleza y duración de la perturbación
- Respuesta transitoria del sistema ante una perturbación

Oscilografías

Las Oscilografías son gráficas las cuales indican el comportamiento de las corrientes y voltajes y otros parámetros de un sistema eléctrico. Las oscilografías son utilizadas para realizar un análisis luego de que ocurrió un fallo en el sistema. Estas gráficas indican la información de la falla con un tiempo de pre-falla, para los valores de corrientes y voltajes en cada una de las fases y como estas se comportan. La falla se muestra en el orden de los milisegundos en la que el elemento de protección actúa antes y después de la falla, comúnmente se toman 64 muestras por ciclo. En la Figura 12, se aprecia un ejemplo de oscilografía para una falla a tierra en 23kV. (Pérez, 2017)

Figura 12

Esquema de una oscilografía



Nota. Se resalta la oscilografía para una falla a tierra en un sistema de 23kV. Tomado de (Pérez, 2017)

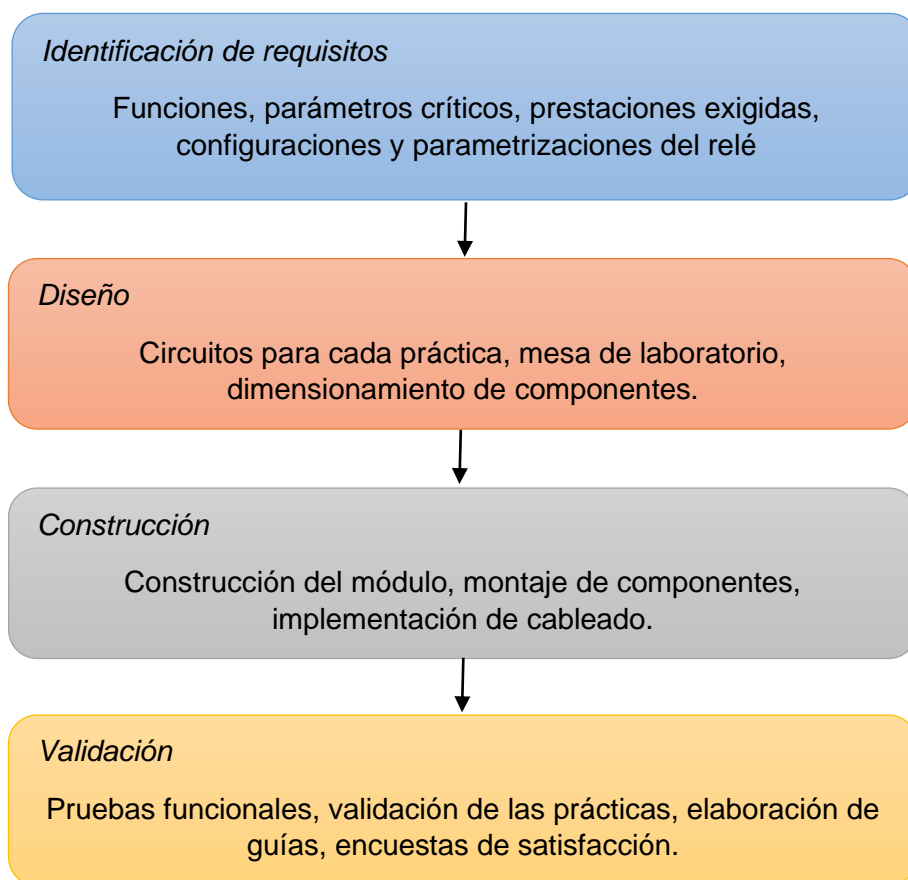
Capítulo III

Metodología

En la Figura 13, se presenta la metodología aplicada para la elaboración del módulo de protecciones eléctricas la cual se divide en cuatro partes y se detalla a continuación.

Figura 13

Metodología para diseñar e implementar un módulo de protecciones eléctricas



A. Identificación de requisitos

El proceso comienza con la identificación de las funciones y parámetros más relevantes que deben ser puestos en consideración, teniendo en cuenta aspectos importantes como: sus parámetros disponibles, configuraciones para equipos de medición y control, su lógica de disparo y los equipos disponibles en la universidad. Esta fase realiza una investigación

detallada asegurando las prestaciones y límites que tienen las protecciones para que el módulo cumpla con los requisitos establecidos en términos de usabilidad, fiabilidad y seguridad. Esta sección es sumamente importante ya que será la base para conocer que fenómenos reales se pueden replicar en un entorno controlado para utilizar las protecciones de sobrecorriente y subfrecuencia.

B. Diseño

La fase de diseño del módulo de protecciones eléctricas, empieza con los cálculos en un SEP que se pueden replicar en el módulo. El mismo que es de suma importancia para la configuración de los relés, seguidamente se realiza los diseños de planos eléctricos de control y de potencia, para variar entre prácticas. Para albergar todos los componentes del módulo se realiza un diseño detallado el cual incluye el diseño 3D donde se encuentran los componentes eléctricos como: borneras, contactores, resistencias, pulsadores, luces, entre otros. Este diseño busca realizar una secuencia detallada para optimizar su construcción, la disposición de los equipos y dar una mejor ergonomía al usuario.

C. Construcción

En esta etapa se lleva a cabo la materialización del módulo de protecciones eléctricas, aquí se emplean todos los diseños anteriores para su construcción. El proceso toma en cuenta los planos del armatoste, tanto mecánicos como eléctricos y de control, los cuales serán de suma importancia para su construcción e instalación de los equipos como: relés, elementos de medición, cargas resistivas y demás equipos, asegurando que el módulo cumpla con sus objetivos y brinde a los usuarios la mejor experiencia a la hora de realizar las prácticas correspondientes.

D. Validación

En la sección presente se realiza la comprobación de las guías, las cuales tienen un componente teórico combinado con otro práctico. Tras realizar las guías se pone en contraste

los resultados obtenidos de manera teórica con los resultados obtenidos al realizar las prácticas en el laboratorio. Esto se evalúa en una muestra de estudiantes los cuales responden una encuesta de satisfacción la cual demostrará el grado de efectividad del módulo de prácticas. Ratificando su uso como una herramienta de ayuda para la cátedra de protecciones eléctricas capaz de clarificar los fenómenos eléctricos estudiados y teniendo un acercamiento real a equipos utilizados en el entorno laboral.

Capítulo IV

Caso de estudio

El presente capítulo tiene como objetivos tres aspectos a desarrollar: estudio de variables, diseño y validación. En primer lugar, se exploran y examinan diversas variables clave de la configuración del relé SIPROTEC, como los parámetros del relé, la configuración de los TC's y los TP's, así como el uso de Masking I/O y la lógica de disparo. Posteriormente, se realiza el diseño del módulo, teniendo en consideración aspectos como los cálculos de sobrecorriente y subfrecuencia, el diseño del circuito de control y potencia, el dimensionamiento de componentes, los costos asociados, la construcción y puesta en marcha del módulo. Finalmente, se ejecutan las prácticas sobre una muestra de alumnos para verificar la efectividad, esto se comprueba con una encuesta de satisfacción para tener una retroalimentación de las falencias y dar una mejor experiencia a los estudiantes.

Este caso de estudio proporciona una visión completa de todo el proceso de implementación del proyecto, desde la planificación inicial hasta la implementación y ejecución exitosa de cada práctica de laboratorio con el módulo de protecciones eléctricas.

Estudio de variables

Se toma en consideración los equipos disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas, los cuales son motores de CC y CA, los que ayudan a realizar la práctica de subfrecuencia, simulando el motor-generador, pero resaltamos los equipos claves los cuales son los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens. Los mismos que son la base para realizar las prácticas. Los relés ofrecen un gran abanico de parámetros configurables como las características de las curvas de tiempo inverso, los escalones de frecuencia, la lógica de disparo, configuración de Masking I/O, entre otros parámetros. Es por lo que se investiga detalladamente sus configuraciones tanto en software como en hardware para maximizar su rendimiento.

Parámetros y configuraciones para sobrecorriente

La protección de sobreintensidad es adecuada para redes radiales o redes en anillo, así como una función de reserva en dispositivos de protección por comparación para diversos elementos como líneas, transformadores, generadores, motores y barras colectoras, esta protección puede responder efectivamente a las condiciones de sobrecorriente sin depender de la dirección del flujo de corriente. (SIPROTEC, 2004, p. 61).

En la protección de sobrecorriente se identifica que se dispone de la protección para fases y para tierra, pero de manera específica hay varios parámetros que son analizados para tener una correcta implementación. Se estudian a profundidad las especificaciones brindadas por el fabricante las cuales incluyen los parámetros fijos y programables, su configuración previa, su lógica de disparo, señales de aviso y señales digitales de entrada y salida. El manual del fabricante se convierte en una herramienta indispensable durante este proceso, proporcionando una guía detallada sobre las funciones del relé y cómo optimizar su configuración para garantizar una protección efectiva del SEP.

El software DIGSI 4 se emplea para realizar las configuraciones en los relés SIPROTEC hasta su cuarta versión. DIGSI es un software flexible que permite realizar configuraciones personalizadas mediante su lógica de bloques, pero sin pasar por alto que las configuraciones principales están predeterminadas para que el usuario puede habilitar o deshabilitar funciones según la aplicación. Se puede destacar las siguientes funciones características de sobrecorriente:

- Tiempo definido
- Curvas de tiempo inverso ANSI
- Curvas de tiempo inverso IEC
- Curvas características personalizadas por el usuario

El nivel de flexibilidad y control proporcionado por DIGSI es muy amplio ya que brinda la capacidad de adaptar la protección del relé a las condiciones y requisitos específicos de cada aplicación eléctrica bajo el criterio del usuario.

Unidad de tiempo definido

Para llevar a cabo la práctica de sobrecorriente, se implementa una unidad de tiempo definido, cuyos parámetros y configuraciones asociadas son fundamentales para asegurar una respuesta rápida y eficaz ante condiciones anormales de corriente. Es importante destacar que el relé SIPROTEC 7SJ62 cuenta con una unidad instantánea tanto para las fases como para la tierra, lo que aumenta su versatilidad y capacidad de respuesta ante eventos de sobrecorriente.

En el Anexo 7 se incluye una guía detallada de la configuración tanto de la unidad instantánea como de las curvas de tiempo inverso. Esta guía proporciona instrucciones claras y precisas para ajustar los parámetros necesarios del software DIGSI. Además de los detalles técnicos presentados en la guía, se proporcionan recomendaciones prácticas y consideraciones importantes para optimizar el rendimiento y el tiempo de configuración. En la Figura 14, se ilustra la ventana específica de DIGSI utilizada para cargar los parámetros de la unidad instantánea, lo que facilita el proceso de configuración y asegura una correcta implementación de la protección contra corrientes muy altas en el relé SIPROTEC 7SJ62.

Figura 14

Parámetros para protección de la unidad instantánea del relé SIPROTEC

Settings:

No.	Settings	Value
1202	I>> Pickup	3,00 A
1203	T I>> Time Delay	0,00 sec
1204	I> Pickup	∞ A
1205	T I> Time Delay	0,00 sec

Nota. Se presentan los parámetros configurables en el relé SIPROTEC 7SJ62 para la unidad de tiempo definido, parámetros contra sobrecarga y cortocircuito.

Curvas de tiempo inverso

Las curvas de tiempo inverso muestran la relación entre el tiempo de operación y la corriente de falla, con la característica de que, a mayores corrientes los tiempos de operación son más cortos. Esto significa que los dispositivos de protección responden más rápidamente ante corrientes elevadas, lo que ayuda a limitar el daño causado por sobrecorriente en el sistema eléctrico.

El relé SIPROTEC 7SJ62 brinda una versatilidad excepcional al permitir al usuario elegir entre dos estándares de curvas, ya sea el estándar IEC o el ANSI. Además, ofrece la capacidad de crear curvas personalizadas, lo que permite adaptar la protección contra sobrecorriente a las necesidades específicas de cada usuario. Esta flexibilidad es esencial para garantizar una protección óptima y apta especialmente cuando se quieren añadir protecciones aguas abajo teniendo un SEP con protecciones eléctricas instaladas y coordinadas donde se pueden encontrar curvas de fusibles, reconectores, entre otros. Para realizar la programación detallada de esta función sobre el software DIGSI, se proporciona este recurso en el Anexo 7, donde se detallan los pasos y procedimientos para realizar una programación precisa y útil.

Figura 15

Parámetros para protección de la unidad temporizada del relé SIPROTEC

Settings:

No.	Settings	Value
1207	Ip Pickup	1,10 A
1209	TIME DIAL: TD	1,00
1210	Drop-Out Characteristic	Instantaneous
1212	ANSI Curve	Moderately Inverse

Nota. Se observan cuatro parámetros programables para las curvas de tiempo inverso, que pueden usarse a conveniencia del usuario.

La Tabla 2 presenta las diversas opciones de ajuste disponibles para la protección de sobrecorriente, tanto en términos de tiempo definido como de tiempo inverso. En esta tabla se detallan de manera concisa las configuraciones disponibles, lo que proporciona una visión general de las posibilidades de configuración del relé. Además, se ofrecen breves indicaciones sobre cómo proceder con la configuración, lo que facilita el proceso de ajuste y garantiza una correcta implementación de la protección eléctrica.

Tabla 3

Parámetros para protección de sobrecorriente, (SIPROTEC, 2004, pp. 85-86).

Dirección	Parámetro	Posibilidad de ajuste	Descripción
1201	Phase time overcurrent	ON/OFF	Protección de sobrecorriente en las fases
1202	I>> Pickup	0.1 – 35 A; ∞	Corriente de arranque (disparo), escalón alta intensidad
1203	T I>>	0 – 60 s; ∞	Temporización, escalón alta intensidad
1204	I> Pickup	0.1 – 35 A; ∞	Corriente de arranque (disparo), escalón intensidad
1205	T I>	0 – 60 s; ∞	Temporización, escalón alta intensidad
1207	I _p Pick up	0.1 – 4 A;	Valor mínimo de arranque

Dirección	Parámetro	Posibilidad de ajuste	Descripción
1210	Drop-out	Instantáneo; Emulación	Reposición con emulación de
	Characteristic	de disco	disco
1212	ANSI curve	Muy inversa	Características de disparo de las curvas ANSI
		Inversa	
		Inversa Corta	
		Inversa Larga	
		Moderad.inversa	
		Extremada.inv	
		Inv.Definida	

Nota. En la tabla se presentan detalladamente los parámetros principales para la configuración de sobrecorriente para unidad instantánea y tiempo inverso.

Parámetros y configuraciones para frecuencia.

Se identifica que la protección de subfrecuencia ofrecida por el relé de Siemens presenta varias ventajas significativas. Una de ellas es la capacidad de configurar hasta 4 escalones independientes, tanto para frecuencias altas como bajas. Esta versatilidad permite ajustar la protección de manera precisa para adaptarse a una amplia gama de escenarios y condiciones operativas. Además, la capacidad de definir el tiempo de disparo proporciona un control preciso sobre la respuesta del sistema, lo que contribuye a una protección más efectiva ante contingencias de frecuencia.

Dentro de los parámetros fundamentales para la protección de subfrecuencia se encuentra el valor mínimo de voltaje necesario para el bloqueo de esta función de protección. Los datos introducidos en esta configuración se basan en cálculos específicos diseñados para

optimizar la protección de subfrecuencia y asegurar una respuesta eficaz ante eventos anormales en el SEP.

Figura 16

Configuración de protección de frecuencia

Settings:

No.	Settings	Value
5404	F1 Pickup	59,40 Hz
5405	T F1 Time Delay	2,00 sec
5407	F2 Pickup	58,80 Hz
5408	T F2 Time Delay	1,00 sec
5410	F3 Pickup	57,80 Hz
5411	T F3 Time delay	0,50 sec
5413	F4 Pickup	64,00 Hz
5414	T F4 Time delay	00 sec

Nota. En la figura se presenta la ventana del software DIGSI para configurar los cuatro escalones de frecuencia temporizados.

El relé ofrece la capacidad de establecer un tiempo de retardo desde cero segundos (instantáneo), lo que permite una respuesta inmediata ante eventos de subfrecuencia si así lo requiere el usuario y el sistema. Para obtener información adicional sobre la configuración y aplicación de esta función, se puede consultar el Anexo 8, donde se detallan los procedimientos y directrices específicas para su ajuste y aplicación.

Masking I/O

La sección de "Masking I/O" del software DIGSI es sumamente importante, ya que brinda la capacidad de configurar las 8 entradas, 8 salidas y los 7 indicadores led del relé 7SJ62, la cual se puede configurar para diversos parámetros relacionados con todas las protecciones que cuenta el dispositivo. Aquí se presenta la opción para la activación de todas las salidas, al seleccionar "L" (latched/ bloqueo o guardado) mantiene activas las salidas hasta

parámetros relacionados con los disparos (trip), los cuales, al detectar una falla y transcurrido el tiempo configurado, activan acciones de despeje o aíslan la falla. Para obtener detalles adicionales sobre la configuración del Masking I/O, se recomienda consultar el Anexo 2, donde se proporciona información detallada sobre los parámetros disponibles y su configuración.

Las salidas binarias se utilizan principalmente para asignar una señal a otro equipo que realice la desconexión de carga o parte del SEP ante las fallas de sobrecorriente o subfrecuencia, permitiendo aislar la falla o minimizar las perturbaciones del sistema, por otro lado, los indicadores LED's muestran cuando se activa cada parámetro de las protecciones lo cual hace más didáctico el proyecto, permitiendo identificar fácilmente los tipos de perturbaciones que se presentan en cada práctica.

Configuración para TC's y TP's

La correcta configuración de los TP's y TC's en los relés de protección SIPROTEC es esencial para garantizar un funcionamiento fiable y preciso en el sistema eléctrico. Estos dispositivos juegan un papel crucial al medir corrientes y tensiones en magnitudes seguras y manejables para el relé de protección.

Se explora en detalle los parámetros clave de la configuración de TP's y TC's en los relés SIPROTEC, destacando su importancia fundamental en la exactitud y eficacia de la protección eléctrica. Esencialmente, la adecuada disposición y ajuste de estos transformadores no solo aseguran que el relé pueda detectar y responder eficazmente ante condiciones anormales, sino que también previenen activaciones erróneas que podrían resultar en interrupciones no deseadas del sistema.

Al considerar las magnitudes de corriente y voltaje que manejan estos transformadores, su correcta instalación y configuración se convierten en un punto crítico para la seguridad y correcta medición y control del sistema eléctrico. Además, una configuración precisa garantiza

que los relés de protección actúen de manera oportuna y precisa, lo que minimiza el tiempo de inactividad y protege los activos del sistema contra daños costosos.

Configuración de TC's

El relé SIPROTEC permite en sus configuraciones tener un TC que posea en el lado primario valores desde 10 a 50000 amperios, pero en el lado del secundario solo cuenta con dos opciones que son de 5 A y de 1 A. La opción preestablecida es la de 5 amperios, pero se elige cambiar a 1 amperio debido a la naturaleza didáctica del módulo, donde la presencia de corrientes elevadas puede conllevar a mayores riesgos. Además, esta decisión facilitará la construcción de la parte de potencia en el contexto del laboratorio. El proceso se realiza como se indica en el Anexo 3.

Configuración de TP's

Para los transformadores de potencial, la configuración se simplifica considerablemente, ya que se pueden escribir los valores deseados del primario y secundario, en un amplio intervalo, y elegir la conexión, ya sea para un sistema trifásico o monofásico. El valor del primario del transformador de potencial en kilovoltios es ajustable en un rango que va desde 0.1 hasta 800 kV. En lo que respecta al secundario, se tiene la flexibilidad de ajustar su valor en un rango que va desde 100 hasta 225 V, considerando los valores de voltaje de línea a línea, lo que se ajusta correctamente con las fuentes y módulos que se tiene en el laboratorio.

Además, se puede seleccionar la configuración de conexión del transformador de tensión donde es necesario considerar las siguientes opciones: Cuando la conexión se especifica "3 fases = U1E, U2E, U3E" indica que las tres tensiones de fase están conectadas en una configuración de estrella. Por otro lado, si se establece "3 fases = U12, U23, UE", significa que existe una conexión con dos tensiones fase-fase (conexión en V), junto con la tensión Uen. La elección adecuada de esta configuración es esencial para garantizar una

interpretación correcta de las mediciones y asegurar el funcionamiento eficiente del transformador de tensión en el sistema eléctrico. Es decir, el equipo cuenta con la posibilidad de conectar los transformadores de potencial con 3 fases a tierra, con 2 tensiones fase-fase adicionalmente la tensión de desplazamiento y también conexión monofásica (SIPROTEC, 2004).

Tabla 4

Conexión de los transformadores de potencial.

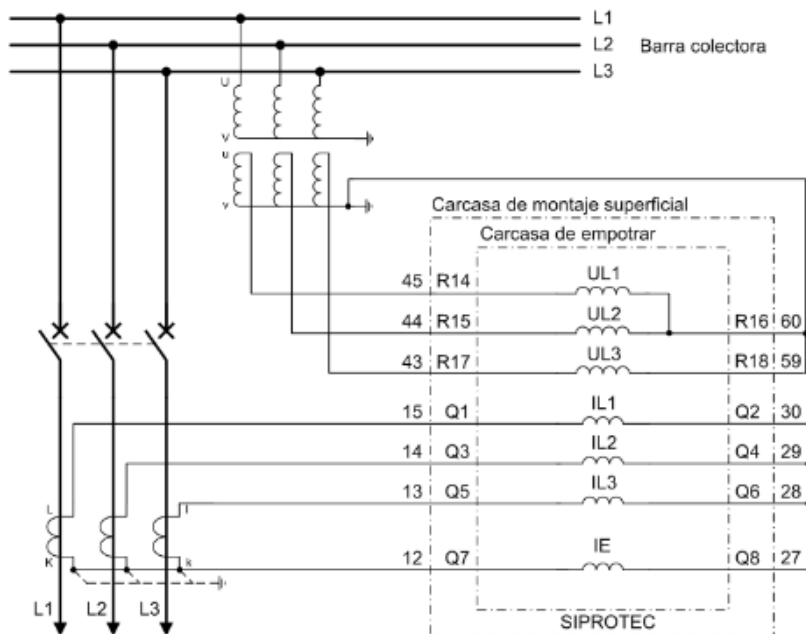
Dir.	Parámetro	Posibilidades de ajuste	Preajuste	Explicación
213	CONEX.TT	U1E, U2E, U3E	U1E, U2E, U3E	Conexión
	3fases	U12, U23, UE		transformador tensión,
		U1E, U2E, U3E, UE U1 E,		3 fases
		U2E, U3E, USY		

Nota. En la Tabla 3 se detalla los ajustes para las conexiones de los transformadores de potencial. Tomado de (SIPROTEC, 2004).

Para el presente modelo de relé, se establece una disposición precisa de los TP's y TC's, asegurando una adecuada conexión y procesamiento de las señales eléctricas para su posterior análisis. El diagrama de conexión mostrado en la Figura 18 proporciona una guía clara y práctica para la instalación y configuración de los TP's y TC's, contribuyendo así a la correcta implementación del SEP simulado que satisface los escenarios de falla por sobrecorriente y subfrecuencia.

Figura 18

Ejemplo de conexiones para los TP's y TC's en un SEP



Nota. En la figura se detalla las conexiones para los TP's y TC's necesarias para el funcionamiento del sistema de protección. Tomado de (SIPROTEC, 2004).

Lógica de disparo

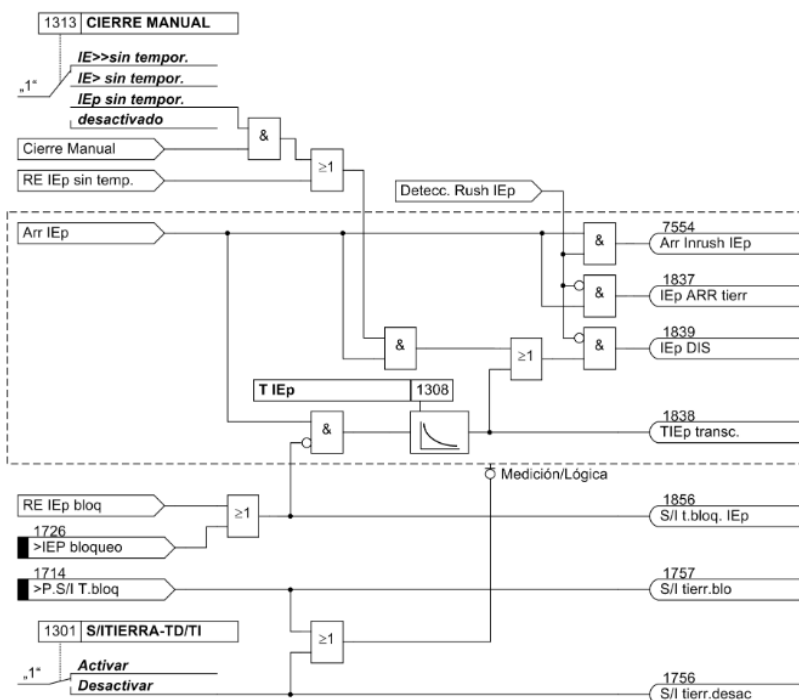
Para comprender el proceso completo, desde la activación de las entradas o salidas binarias hasta la ejecución de los disparos de las salidas, es necesario examinar los diagramas de bloque que vienen preestablecidos en la memoria del relé los cuales vienen descritos en el manual del equipo. Este estudio proporciona una visión detallada tanto del funcionamiento interno como externo del relé, en donde se identifica la lógica de interconexión entre las diversas etapas del proceso, lo que facilita una configuración y operación efectivas del dispositivo en diversas condiciones.

Lógica para sobrecorriente

En la Figura 19, el relé realiza la detección de la activación de la función número 1201 correspondiente a la sobrecorriente en fases, posteriormente, el relé monitoriza si la corriente excede los límites establecidos para el tiempo definido o inverso. Una vez detectada la condición de sobrecorriente, el relé activa la señal de inicio de la protección y simultáneamente inicia un temporizador. Después de transcurrir el tiempo configurado, el relé procede a activar o disparar las salidas que fueron previamente configuradas para responder a la condición de sobrecorriente, proporcionando así una respuesta controlada y temporalmente gestionada.

Figura 19

Diagrama lógico de la protección de sobreintensidad dependiente (S/I) para fases



Nota. En el diagrama muestra como interactúan las señales de entrada y salida, tanto externas como internas del relé para la protección de sobrecorriente, mediante un diagrama de bloques.

Tomado de (SIPROTEC, 2004, p. 69).

En caso de una avería, también es posible activar la protección de sobreintensidad sin la aplicación de temporización mediante la acción manual número (1213). Es esencial asegurarse de que los bloqueos de sobrecorriente instantánea, identificados como bloqueo de corriente primaria (número 1723) y bloqueo de sobreintensidad en fases (número 1704), estén desactivados o no configurados.

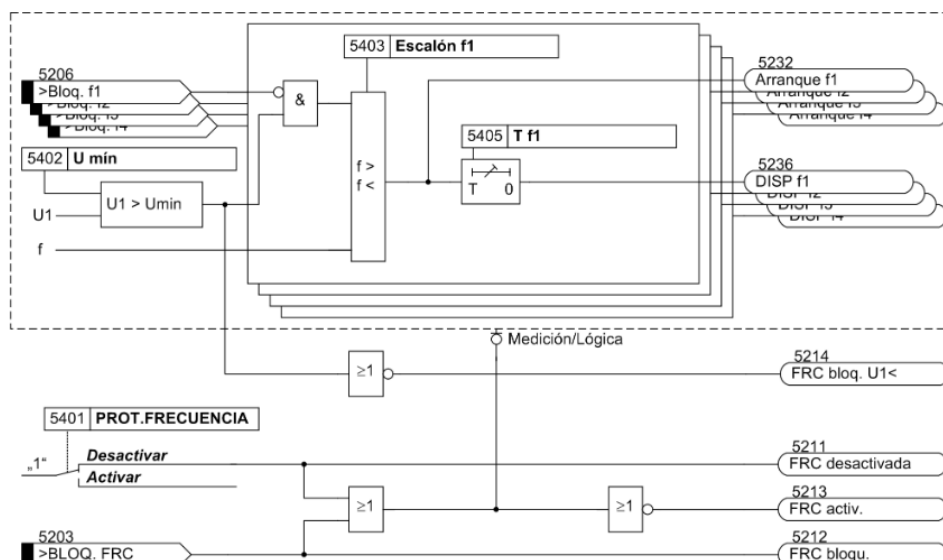
Lógica para frecuencia

La protección de frecuencia para el relé SIPROTEC 7SJ62 ofrece la capacidad de configurar hasta cuatro escalones tanto para sobrefrecuencia como para subfrecuencia, cada uno siguiendo una lógica predefinida para su activación. En primera instancia, se requiere que el voltaje de los transformadores de potencial sea superior al voltaje mínimo establecido. Además, es necesario que el bloqueo de frecuencia no esté configurado o se encuentre desactivado.

Posteriormente, el proceso inicia con la comparación de la frecuencia medida con el umbral del primer escalón de frecuencia. Solo después de verificar que las condiciones anteriores se cumplen, y en caso de detectar una anomalía en la frecuencia, se genera un mensaje en la pantalla. Tras un intervalo de tiempo predefinido, se emite la señal de disparo o activación de la salida binaria correspondiente. Este enfoque secuencial garantiza una respuesta controlada y efectiva ante variaciones inesperadas en la frecuencia del sistema. A continuación, se presenta la lógica de la protección de frecuencia mediante un diagrama de bloques.

Figura 20

Diagrama lógico para la protección de frecuencia



Nota. En el diagrama se muestra como interactúan las señales de entrada y salida, tanto externas como internas del relé para la protección de frecuencia, mediante un diagrama de bloques. Tomado de (SIPROTEC, 2004, p. 178).

Además de las consideraciones mencionadas anteriormente, para que funcione la protección de frecuencia, esta debe estar activada, además el parámetro de bloqueo de frecuencia debe estar sin configurar o desactivado y debe existir una correcta conexión de la secuencia de fases del generador con el relé, asegurando que la protección sea efectiva cuando se requiera.

Recopilación de datos de los equipos del laboratorio utilizados

Para la alimentación del módulo de protecciones, se tiene disponible un suministro eléctrico en el laboratorio de máquinas eléctricas el cual proporciona un voltaje de línea a línea (LL) de 208 V, una corriente máxima de 20 A. Además, está equipado con conexiones para

neutro y tierra, el cual energizará los relés de protección, el sistema de control, y para el caso de sobrecorriente alimentará las resistencias de potencia.

En el caso de la práctica de subfrecuencia, se emplea una máquina de corriente continua como motor de excitación independiente la cual arrastrará mediante una correa y poleas a la máquina sincrónica que funciona como generador. Las características del motor y generador son las que se presenta en la Tabla 4.

Figura 21

Motor y generador acoplados mecánicamente



Nota. En la figura se muestra la máquina de corriente continúa funcionando como motor acoplado mediante una banda a la máquina sincrónica funcionando como generador.

Tabla 5

Características del generador trifásico y motor de corriente continua.

Máquina sincrónica como generador	Máquina de corriente continua como motor de excitación independiente
S: 120 VA	P: 175 W
1800 rpm	1800 rpm
V_{LL} : 208 V	I: 2.8 A
I: 0.33A	V: 120 V (voltaje variable en el rotor)
f :60 Hz	V: 120 V (voltaje fijo en el estator)

Nota. Se presentan las principales características de la máquina sincrónica funcionando como generador y de la máquina de corriente continua como motor de excitación independiente.

La alimentación tanto del motor como de la excitatriz del generador se realiza a través de la fuente de corriente continua del módulo de alimentación del laboratorio, en el cual se tiene la fuente fija de corriente continua a 120 V y la fuente variable de corriente continua con un rango de 0-120 V para garantizar un control preciso de la alimentación en la práctica.

Diseño

Una vez obtenidos los parámetros que comprueban la viabilidad de la construcción del módulo, se procede a avanzar a la presente sección en la cual se realizan los cálculos detallados para ajustar adecuadamente los dispositivos de protección. Esto garantiza una respuesta eficaz ante situaciones de cortocircuito y, por otro lado, ante las variaciones en la frecuencia eléctrica. Estos cálculos son fundamentales para el diseño del banco de resistencias, el cual ayuda a simular las situaciones de contingencia. Además, se elaboran los planos eléctricos de todo el circuito y los diseños para la estructura del armario. Se puede revisar los Anexos 4 y 5 para mayor detalle.

Cálculos para protección de sobrecorriente

Los cálculos para la protección de sobrecorriente son esenciales para avanzar en el diseño del módulo de protecciones eléctricas. Estos cálculos permiten simular un SEP real, utilizando componentes eléctricos disponibles para determinar los umbrales de corriente de disparo necesarios. Además, son fundamentales para dimensionar adecuadamente los dispositivos necesarios durante la etapa de construcción del módulo.

En el proceso de cálculo para la protección de sobrecorriente se considera varios factores, como las características del sistema eléctrico en el que se implementará el módulo de protecciones, las cargas conectadas, los picos de corriente esperados y la manera didáctica de presentarla a los estudiantes.

En primera instancia se debe diseñar un SEP que brinde escenarios que se pueden simular y replicar en el módulo, con lo cual se presentan sus características:

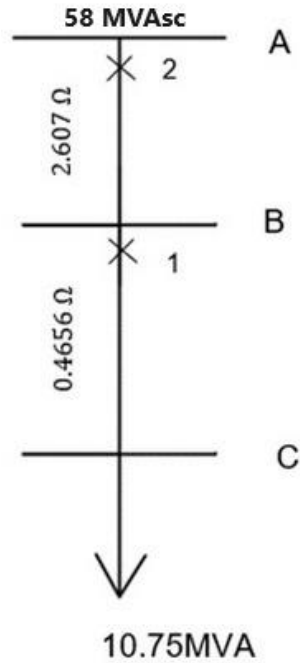
Tabla 6

Potencia de cortocircuito de la external grid

BARRA	P_{sc} [MVA]
A	58

Figura 22

SEP para práctica de sobrecorriente.



Se calculan las impedancias del sistema:

$$Z_{fuente} = \frac{V^2}{P_{sc}}$$

$$Z_{fuente} = \frac{13.8^2 kV}{58 MVA}$$

$$Z_{fuente} = 3.283 \Omega$$

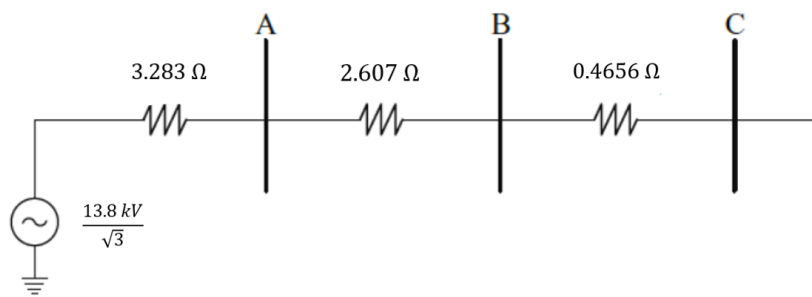
$$Z_{LT-AB} = 2.607 \Omega$$

$$Z_{LT-BC} = 0.4656 \Omega$$

Obteniendo un diagrama simplificado de la siguiente manera:

Figura 23

Esquema de impedancias



Con el propósito de dimensionar los TC's se deben determinar las corrientes nominales, en este caso se toma la corriente nominal del cable de nuestro SEP el cual es ACSR 750MCM teniendo:

$$I_n = 450 \text{ A}$$

Se determina la corriente de cortocircuito para cada barra:

$$I_{sc_C} = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3} (0.4656 + 2.607 + 3.283)}$$

$$I_{sc_C} = 1253.6084 \text{ A}$$

$$I_{sc_B} = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3} (2.607 + 3.283)}$$

$$I_{sc_B} = 1353.7052 \text{ A}$$

$$I_{sc_A} = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3} (3.283)}$$

$$I_{sc_A} = 2426.8759 \text{ A}$$

Teniendo el siguiente cuadro resumen:

Tabla 7

Datos de cada barra del SEP para la práctica de sobrecorriente

BARRA	P	I_{nom}	I_{sc}	$(5/100)I_{sc}$	CT ratio
	[MVA]	[A]	[A]	[A]	
A	10.75	450	2426.87	121.34	500/1
B	10.75	450	1353.71	67.68	500/1
C	10.75	450	1253.61	62.68	1000/1

Protección con un relé de sobrecorriente. Con los valores calculados anteriormente se procede al cálculo de los valores de pick-up del relé.

$$I_{p-u_{R1}} = 1.3 (450) \left(\frac{1}{500} \right) = 1.17 A$$

$$P_{u_{R1-Ajus}} = 1.1 A$$

Ahora se procede al cálculo del "Time Dial" y el ajuste de la unidad instantánea:

Relé 1:

$$I_{p-u} = 1.1 \times \frac{500}{1} = 550A$$

$$Time\ Dial\ Setting = 0.5$$

$$Unidad\ instantanea = (1 \times I_{sc}) \left(\frac{1}{CTR} \right)$$

$$I_{u-ins} = (0.75 \times 2426.87) \left(\frac{1}{500} \right) = 3.64 A$$

$$I_{u-ins} = 3.7 A$$

$$I_{u-ins} = 3.7 \times \frac{500}{1} = 1850 A$$

$$PSM_b = \left(1850 \times \frac{1}{500} \right) \times \frac{1}{1}$$

$$PSM_b = 3.7 \text{ veces}$$

Teniendo $PSM_b = 3.7 \text{ veces}$ y un Time dial de 0.5 entonces: $t_{1b} = 0.15$

Tabla 8

Resultados para la protección de sobrecorriente

Relé	Pick-up (A)	Time dial	Instantáneo I_{sec} (A)	Instantáneo I_{pri} (A)
1	1.1	0.5	3.7	1850

Coordinación con dos relés de sobrecorriente

Con los valores calculados anteriormente se procede al cálculo de los valores de pick-up del relé.

$$I_{p-u_{R1}} = 1.3 (450) \left(\frac{1}{500} \right) = 1.17 A$$

$$P_{u_{R1-Ajus}} = 1.1$$

$$I_{p-u_{R2}} = 1.3 (450) \left(\frac{1}{500} \right) = 1.17 A$$

$$P_{u_{R2-Ajus}} = 1.1$$

Ahora se procede al cálculo del "Time Dial" y el ajuste de la unidad instantánea:

Relé 1:

$$I_{p-u} = 1.1 \times \frac{500}{1} = 550 \text{ A}$$

$$\text{Time Dial Setting} = 1.0$$

$$\text{Unidad instantanea} = (1 \times I_{sc}) \left(\frac{1}{CTR} \right)$$

$$I_{u-ins} = (1 \times 1269.5) \left(\frac{1}{500} \right) = 2.53 \text{ A}$$

$$I_{u-ins} = 2.75 \text{ A}$$

$$I_{u-ins} = 2.75 \times \frac{500}{1} = 1375 \text{ A}$$

$$PSM_b = \left(1375 \times \frac{1}{500} \right) \times \frac{1}{1}$$

$$PSM_b = 2.75 \text{ veces}$$

Teniendo $PSM_b = 2.75 \text{ veces}$ y un Time dial de 1 entonces: $t_{1b} = 0.4$

Relé 2:

Con 1300 A, la operación de t_{2a} debería ser ajustado al menos a $0.4+0.4=0.8 \text{ s}$

$$PSM_a = \left(1375 \times \frac{1}{500} \right) \times \frac{1}{1} = 2.75 \text{ veces}$$

Con un PSM en 2.75 veces, y t_{op} de al menos 0.8s, el Time dial escogido es de 2.

$$\text{Time Dial Setting} = 2$$

$$\text{Unidad instantanea} = (1.25 \times I_{scb}) \left(\frac{1}{CTR} \right)$$

$$I_{u-ins} = (1.25 \times 1269.5) \left(\frac{1}{500} \right) = 3.17 A$$

$$I_{u-ins} = 3.25 A$$

$$I_{u-ins} = 3.25 \times \frac{500}{1} = 1625A$$

$$PSM_b = \left(1625 \times \frac{1}{500} \right) \times \frac{1}{1}$$

$$PSM_b = 3.25 veces$$

Teniendo $PSM_b = 3.25 veces$ y un Time dial de 2 entonces: $t_{2b} = 0.7$

Teniendo como resultado para nuestros relés la siguiente tabla resumen:

Tabla 9

Resultados calculados para coordinación de la protección de sobrecorriente

Relé	Pick-up (A)	Time dial	Instantáneo I_{sec} (A)	Instantáneo I_{pri} (A)
1	1.1	1	2.75	1375
2	1.1	2	3.25	1625

Cálculos para protección de subfrecuencia

Para diseñar los circuitos que simulan el sistema de potencia en la práctica de subfrecuencia, primeramente, se realizan cálculos detallados considerando la frecuencia nominal, umbrales de subfrecuencia, tiempos de retardo y datos específicos del generador. Estos cálculos aseguran una representación precisa de las condiciones del sistema eléctrico en la práctica.

Teniendo en cuenta que para la práctica de subfrecuencia, se inicia operando el sistema motor-generador únicamente con la carga mecánica producida por el acoplamiento mediante la

banda, con la frecuencia nominal de 60 Hz. Posteriormente, al conectar las salidas del generador a los transformadores de tensión, se introducen las cargas trifásicas al sistema, lo que resulta en una sobrecarga y disminución de la frecuencia del sistema. En este escenario, se procede a calcular los escalones de subfrecuencia, tal como se muestra a continuación.

Tabla 10

Datos de placa del generador trifásico

potencia de la placa del generador	S: 120 VA= 0.00012 MVA
Velocidad	1800 rpm
frecuencia nominal	fo=60 Hz
potencia de desconexión de carga	$P_A = P_M - P_E$

Nota. Datos de placa necesarios de la máquina sincrónica funcionando como generador.

Así mismo se realizan medidas de la masa y radio del rotor del generador para determinar la inercia mecánica, la cual se calcula a continuación:

- Masa del rotor: 6 kg
- Radio del rotor: 0.04 m

$$I = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{6 \text{ kg}(0.04^2)}{2} = 0.0048 \text{ kg.m}^2 \text{ (Inercia)}$$

A partir del resultado de inercia se puede calcular la energía cinética y posteriormente la constante de inercia rotacional de la siguiente manera:

$$w: 1800 \text{ rpm} = 60\pi \text{ rad/sec}$$

$$E_k = \frac{1}{2}Iw^2 = \frac{0.0048 \text{ kg.m}^2}{2} \left(60\pi \frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right)^2 = 85.273 \text{ J (W.sec)}$$

$$H = \frac{E_k}{S} = \frac{85.273 \text{ W} \cdot \text{sec}}{120 \text{ VA}} = 0.711 \frac{\text{W} \cdot \text{sec}}{\text{VA}}$$

En este caso no se tiene reguladores de velocidad, y en caso de que los tuviera no se toman en cuenta para los cálculos, se considera que el sistema es una red aislada y se debe tener en cuenta la máxima carga a desconectar.

Tabla 11

Cargas a ser desconectadas del sistema

Prioridad	Descripción	MW
1	Load 1	11.367W
2	Load 2	12 W
3	Load 3	12.71 W

1. Se toma en cuenta que las cargas van a frenar muy rápido al generador ya que no cuenta con mucha inercia mecánica, así que el primer escalón del relé de subfrecuencia ocurre cuando la frecuencia disminuye a **59.4 HZ**.
2. El segundo escalón se calcula con la primera carga trifásica, como se muestra a continuación:

$$\text{Carga trifásica} = 11.367W$$

Teniendo en cuenta la máxima carga a desconectar se utilizará la ecuación de oscilación de un generador, que relaciona la tasa de cambio de la frecuencia con respecto al tiempo (RoCoF), cuando ocurre una sobrecarga en la parte de generación de un SEP.

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_a f_o}{2GH} = \frac{-0.000011367MW}{2GH} * 60 = -4 \left[\frac{\text{Hz}}{\text{s}} \right]$$

- Mediante la frecuencia nominal y el RoCoF calculado la función de variación de frecuencia se puede definir de la siguiente manera:

$$f = 60 - 4t$$

$$t_{pick-up} = \frac{60 - 59.4}{4} = 0.15 \text{ sec}$$

- El tiempo de apertura del relé para el primer escalón se calcula teniendo en cuenta los tiempos típicos usados en protecciones en la industria eléctrica los cuales son: 100 ms y del relé 50 ms, entonces:

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{breaker} + t_{relay}$$

$$t_{trip} = 0.15 + 0.1 + 0.05 = 0.3 \text{ sec}$$

- El segundo escalón quedaría definido mediante la función de la frecuencia anterior y el tiempo calculado, como:

$$f = 60 - 4(0.3) = \mathbf{58.8 \text{ Hz}}$$

Luego de la operación del primer y segundo escalón la sobrecarga está determinada por:

$$11.37W + 12W = 23.37W$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{-0.00002337 \text{ MW}}{2GH} * 60 = -8.217 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$$

$$f = 60 - 8.217t$$

-El tiempo de pick-up para la primera etapa se calcula con la nueva tasa de variación:

$$t_{pick-up} = \frac{60 - 59.4}{8.217} = 0.073 \text{ sec}$$

$$t_{trip1} = 0.073 + 0.1 + 0.05 = 0.223 \text{ sec}$$

-Con la nueva función de frecuencia y el tiempo calculado, la frecuencia cae:

$$f = 60 - 8.217(0.223) = 58.168 \text{ Hz}$$

-El valor que produce un pick-up en el segundo escalón se calcula como:

$$t_{pick-up} = \frac{60 - 58.8}{8.217} = 0.146 \text{ sec}$$

$$t_{trip2} = 0.146 + 0.1 + 0.05 = 0.296 \text{ sec}$$

La ecuación de frecuencia muestra la activación $t_{trip1} = 0.223 \text{ s}$ donde ocurre la desconexión de 11.367 W .

Luego de esta activación $P_A = 12.71 \text{ W}$

$$\frac{df}{dt} = \frac{-12.71 \text{ W}}{2GH} * 58.168 = -4.25 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$$

$$f - 58.168 = -4.25(t - 0.223)$$

La frecuencia cae luego del disparo de la carga 2 al siguiente valor:

$$f = 59.115 - 4.25t_{trip2} = 57.857 \text{ Hz}$$

3. El valor del tercer disparo queda ajustado a **57.8 Hz**

Se asigna un tiempo de retardo para el escalón 1 y 2 con el fin de observar de mejor manera el desprendimiento de carga durante la práctica y la oscilografía resultante.

Tabla 12

Escalones de subfrecuencia con su temporización

Escalones de frecuencia	Tiempo de disparo
59,4 Hz	0.3 s
58,8 Hz	0.2 s
57,8 Hz	0.0 s

Nota. Se muestra los resultados para los escalones de subfrecuencia con el tiempo seleccionado de disparo para cada uno.

Diseño del circuito de control y potencia

El diseño del circuito de control y potencia es una pieza fundamental en el proceso de creación del módulo ya que este será el esquema que contiene las conexiones trifásicas tanto para los TP's, TC's, elementos de protección, cargas trifásicas y elementos de control para el funcionamiento ambas prácticas, con el fin de asegurar un funcionamiento eficiente y confiable del sistema. Permitiendo llevar a cabo las condiciones de falla ya calculadas en el sistema y activar los mecanismos de protección cuando sea necesarios, garantizando una respuesta rápida ante situaciones de emergencia.

Para empezar, el proceso de diseño comienza con la creación de diagramas de circuitos utilizando un software de control eléctrico. Se procede con la selección minuciosa de componentes, como relés, sensores y dispositivos de control. Este proceso se basa en los datos obtenidos de los cálculos y el estudio de variables relevantes. Una vez establecidos los parámetros, se desarrolla un circuito de control y potencia que pueda inducir las fallas de sobrecorriente y subfrecuencia requeridas para las prácticas. Durante este proceso, se realizan ajustes continuos para mejorar las conexiones de los componentes y asegurar un control óptimo durante el desarrollo de las prácticas. Además, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los posibles escenarios adversos para garantizar la seguridad y fiabilidad del sistema.

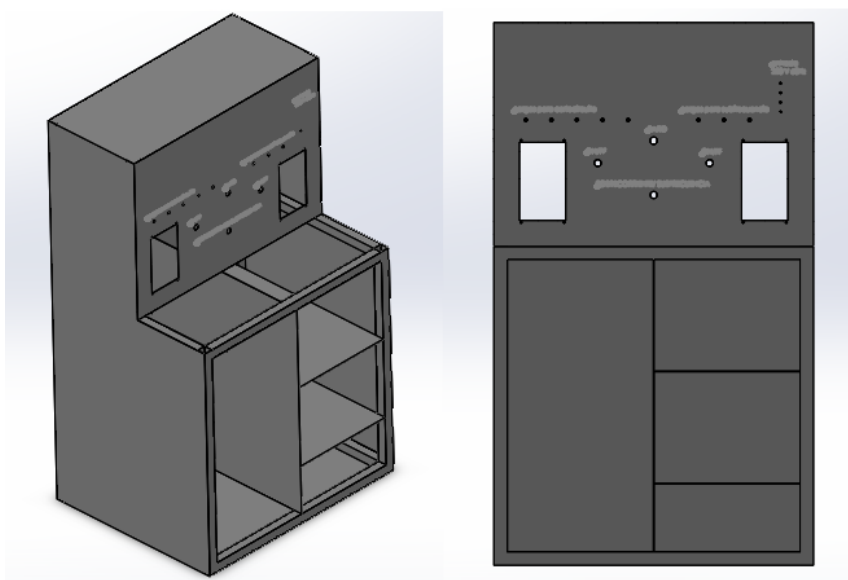
En el Anexo 4, se encuentran detallados los esquemas eléctricos que muestran tanto el circuito de control como el circuito de potencia del módulo de protecciones eléctricas. Estos documentos complementarios proporcionan una visión completa y detallada de la ingeniería detrás del diseño del módulo.

Diseño estructural del módulo

Para realizar el diseño estructural del módulo de protecciones se empieza con una investigación de los módulos relacionados con el tema del proyecto que se han creado en diferentes universidades, luego se realiza los planos tanto en 3D como en 2D en el software SolidWorks, el modelo 3D del mueble debe contener suficiente espacio para colocar los relés SIPROTEC, componentes eléctricos de control, potencia, canaletas, rieles tipo DIN, un ventilador y una superficie para ubicar la computadora, prestando especial atención a las dimensiones y la disposición interna para garantizar que todos los dispositivos eléctricos pudieran ser alojados de manera eficiente y que el acceso para mantenimiento fuera óptimo.

Figura 24

Dibujo 3D de la estructura del módulo



Nota. En la figura se representa la vista isométrica y frontal de la estructura para el módulo de protecciones eléctricas.

También se realiza el diseño del tablero de control donde se realizan orificios para la ubicación de los componentes, organizándolos de tal manera que sea intuitivo para los estudiantes y teniendo una distribución ordenada, teniendo medidas precisas de cada elemento de control, luces piloto y relés SIPROTEC ya que esta parte del módulo se realiza mediante corte laser. Finalmente, se genera planos detallados en el Anexo 5 los cuales se obtuvieron a partir del modelo 3D para facilitar la fabricación del mueble y la instalación de los componentes, estos planos incluyen información precisa sobre dimensiones y ubicación de los elementos eléctricos, garantizando un correcto montaje.

Dimensionamiento de los componentes del módulo.

Para el dimensionamiento de los componentes del módulo de protecciones eléctricas, se realiza un análisis detallado de los requisitos técnicos y condiciones de operación nominal de cada uno de los elementos eléctricos necesarios. Se otorga una atención meticulosa al dimensionamiento de las resistencias, ya que desempeñan un papel crucial en la recreación de condiciones de contingencia reales. Dado que estas resistencias consisten en alambres generalmente de aleaciones de níquel o cromo enrollados, se enfrentan a grandes pérdidas por efecto Joule, es decir se tendrá una alta disipación de calor en el circuito de potencia. Por lo tanto, se determina de manera correcta la potencia disipada por estas resistencias para garantizar el funcionamiento óptimo, precisión de las simulaciones realizadas en el laboratorio y la seguridad para los estudiantes. A continuación, se presentan los cálculos detallados utilizados para determinar los valores de resistencia necesarios:

Tabla 13*Dimensionamiento de resistencias para sobrecorriente*

Resistencia (ohm)	Potencia calculada (W)	Potencia adquirida (W)
24	$24(5^2) = 600$	700
276	$276(0.4^2) = 44.16$	100
97	$97(0.93^2) = 83.9$	150
27	$27(2.24^2) = 135.5 \text{ W}$	150

Tabla 14*Dimensionamiento de resistencias para subfrecuencia*

Resistencia (ohm)	Potencia calculada (W)	Potencia adquirida (W)
3800	$120^2/3800 = 3.79$	10
3600	$120^2/3600 = 4$	10
3400	$120^2/3400 = 4.24$	15

Con base en estos cálculos, se definieron las especificaciones precisas requeridas para las resistencias, incluyendo su valor de resistencia, potencia nominal y tolerancia. Estos datos se utilizaron para solicitar la fabricación de resistencias personalizadas que cumplieran con los requisitos específicos del diseño del módulo, asegurando un rendimiento óptimo y confiable en su funcionamiento.

Costos

En base al dimensionamiento de los elementos eléctricos se seleccionan componentes adecuados con las especificaciones necesarias en el mercado. A continuación se muestran los elementos seleccionados, así como su costo unitario y total.

Tabla 15

Costo de los elementos para la construcción del módulo de protecciones

DENOMINACIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Mesa soporte (Estructura)	1	\$400.00	\$400.00
Disyuntor termomagnético	1	\$30.00	\$30.00
Relés universales	11	\$8.00	\$88.00
Selectores	9	\$2.00	\$18.00
Canaletas	2	\$8.00	\$16.00
Enchufe trifásico	1	\$25.00	\$25.00
Luces piloto	6	\$2.00	\$12.00
Resistencias	25	\$20.00	\$500.00
Cables	4	\$25.00	\$100.00
Riel tipo DIN	1	\$8.00	\$8.00
Componentes electrónicos	40	\$1.00	\$40.00
Fusibles y portafusibles	1	\$6.00	\$6.00

DENOMINACIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Etiquetas para cables	1	\$20.00	\$20.00
Pernos y tuercas	30	\$0.25	\$7.50
TOTAL			\$1270.50

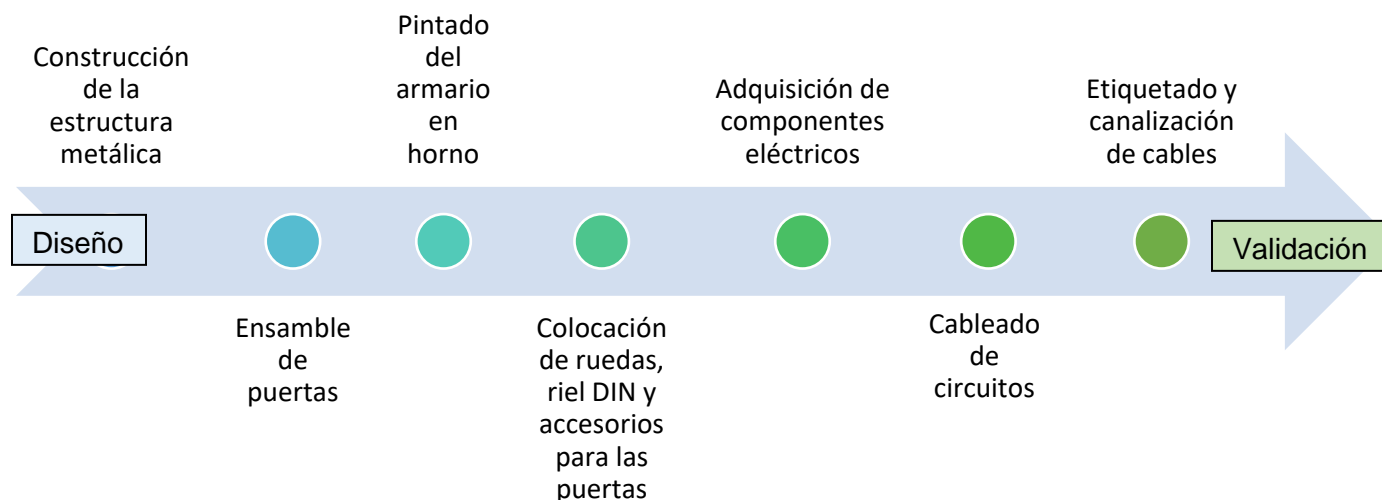
Construcción del módulo

Esta etapa representa la materialización de los conceptos teóricos y los cálculos realizados previamente, donde se transforman los diseños computarizados en estructuras físicas y funcionales. Durante este proceso, se lleva a cabo la integración de componentes eléctricos y electrónicos, la instalación de dispositivos de control y potencia, y la conexión de los sistemas de protección.

La construcción de la estructura del módulo de protecciones eléctricas comienza con la interpretación y aplicación de los planos detallados generados durante la fase de diseño, los cuales incluyen dimensiones precisas y ubicaciones específicas de los elementos. Utilizando herramientas y técnicas adecuadas, se procede a cortar, soldar y ensamblar los materiales necesarios para construir la estructura del módulo. En el Anexo 6 se evidencia la construcción de la estructura donde se puede ver los materiales procesados, el ensamble de componentes y el montaje de sus componentes.

Figura 25

Diagrama del proceso de construcción del módulo de protecciones



Nota. En el diagrama se resumen los pasos secuenciales realizados para la construcción del módulo de protecciones, antes de pasar a la etapa de validación.

Durante este proceso, se ha llevado a cabo la integración de cada componente y sistema diseñado, asegurando su correcta conexión y funcionamiento. Además, se han tomado las medidas necesarias para garantizar la seguridad y fiabilidad del módulo en su operación. Teniendo un módulo de protecciones eléctricas listo para realizar prácticas dentro del laboratorio de máquinas eléctricas, el que ayuda a aumentar la experiencia y habilidad de los estudiantes al aplicar los conocimientos en un entorno laboral, además de poder realizar investigaciones futuras sobre el módulo.

Validación

Durante esta etapa se crean guías de laboratorio que son aplicadas a una muestra de estudiantes de últimos niveles que cursaron la materia de protecciones eléctricas con el fin de evidenciar que las guías prácticas funcionen correctamente y obtener una retroalimentación que permita mejorar ciertos puntos críticos.

Práctica de sobrecorriente

Centrándose en la validación para la práctica de sobrecorriente se aplica una guía diseñada con instrucciones detalladas, objetivos a alcanzar, ejercicios prácticos donde se tendrá varios escenarios y recomendaciones de seguridad para poder llevar a cabo la práctica sin inconvenientes, para que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos en cátedra en un entorno real.

Para obtener datos más precisos sobre la validación de la guía y el impacto que tiene realizar las prácticas, se realizan encuestas a los estudiantes que probaron el módulo de protecciones. Esta encuesta nos ayuda a identificar carencias en la claridad del instructivo, así como sugerencias para seguir mejorando las guías y conocer el nivel de satisfacción de los estudiantes después ejecutar las prácticas de protecciones. Los resultados de la aplicación de las guías y la encuesta permiten mejorar futuras versiones del instructivo y el desarrollo de las prácticas en relación con los conocimientos teóricos.

La guía empleada para desarrollar la práctica de sobrecorriente se encuentra en el Anexo 10, donde se encuentran detallados los pasos, objetivos, materiales a utilizar y datos para realizar los cálculos correspondientes que se necesitan para poder ajustar los relés de protección SIPROTEC.

Práctica de subfrecuencia

Para la validación de la práctica de subfrecuencia, se tiene una guía de laboratorio completa y detallada para los estudiantes, la cual proporciona procedimientos, objetivos específicos y criterios de evaluación para enseñar a los estudiantes la configuración y ajuste de relés de protección ante condiciones de subfrecuencia en un SEP simulado. En el que se debe aplicar los conocimientos teóricos para resolver el ejercicio práctico, calculando los parámetros

que se emplean para ajustar la protección, consiguiendo preparar a los estudiantes para que puedan resolver problemas reales de subfrecuencia en sistemas eléctricos.

Dentro de la guía para la práctica de subfrecuencia se pueden diferenciar 5 pasos principales que deben seguir los estudiantes para que la protección de sobrefrecuencia funcione correctamente, los cuales son:

- Cálculos para protección de subfrecuencia
- Configuración del relé SIPROTEC mediante el software DIGSI
- Conexión del sistema motor-generator
- Manejo del panel de control del módulo
- Registro de resultados

Después de completar las pruebas correspondientes, se realiza una verificación exhaustiva para garantizar el correcto funcionamiento de la protección de subfrecuencia, de acuerdo con los cálculos y parámetros establecidos. Se lleva a cabo una interpretación detallada de la curva de frecuencia del sistema durante la perturbación utilizando el programa gráfico SIGRA 4. Los resultados de esta práctica permiten visualizar la curva de frecuencia en función del tiempo, obteniendo datos adicionales como la frecuencia nadir, la respuesta inercial, el tiempo de desconexión de cada carga y el tiempo en que se estabiliza la frecuencia, lo que ayuda al estudiante a interpretar realmente el fenómeno de la perturbación y a tener bases para investigaciones o modificaciones en base a este campo.

Capítulo V

Análisis de resultados

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos al implementar la metodología, es decir los resultados como el funcionamiento del módulo de protecciones eléctricas, efectividad de las guías prácticas para protección de sobrecorriente y subfrecuencia, desconexión automática de cargas (EDAC), el aislamiento de fallas y análisis de las respuestas de los estudiantes que se sometieron a la encuesta.

Durante este análisis se muestran y comparan los resultados obtenidos mediante el desarrollo de la práctica en el módulo con los cálculos teóricos, así como la interpretación de las oscilografías. Finalmente se analizan los resultados de las encuestas para tener una mejor visión sobre la relevancia que tiene el módulo para el desarrollo profesional de los estudiantes en el ámbito de protecciones eléctricas.

Módulo de protecciones eléctricas

Después de aplicar la metodología de construcción, se obtiene un módulo didáctico para realizar prácticas de protecciones eléctricas con la de sobrecorriente (50/51) y subfrecuencia (81), el cual tiene características ergonómicas, robustas e intuitivas. Es ergonómico por las distancias y disposición de los elementos en el tablero de control, el aspecto robusto se da por los tubos cuadrados de 4x4 cm construido en materiales resistentes como el acero SAE 1008 empleados en la estructura, la cual fue pintada al horno aplicando pintura electrostática adicionando una capa que sirve como aislamiento.

En cuanto al diseño de los circuitos, se ha optimizado el uso de los componentes eléctricos para dar un control fácil y práctico al estudiante. En el circuito de potencia se implementan resistencias fabricadas con características especiales para provocar las corrientes

requeridas en el sistema, con una potencia de disipación que permite dar un funcionamiento seguro y prolongado del módulo.

El cableado interno del módulo se realizó de manera ordenada y meticulosa, identificando la mejor trayectoria y etiquetando los cables para facilitar su reconocimiento en caso de falla en el circuito de control o potencia. Estas características aseguran que el módulo cumpla con los requisitos y funcionalidad esperada para el desarrollo de prácticas de protección de sobrecorriente y subfrecuencia, garantizando la seguridad y confiabilidad durante su empleo en el laboratorio.

Figura 26

Módulo terminado de protecciones eléctricas.



Práctica sobre el módulo para sobrecorriente

Se ha realizado una guía que contiene dos ejercicios prácticos. El primero de ellos contempla una sola protección en la cabecera del SEP, mientras que el segundo analiza una coordinación entre dos relés de sobrecorriente. En estas prácticas se procede a configurar el

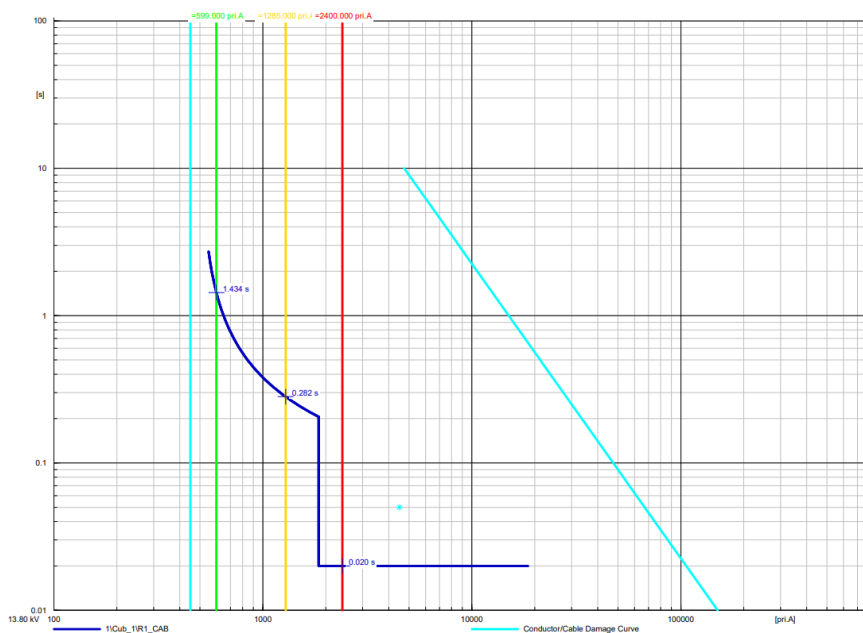
relé de sobrecorriente en el módulo con los parámetros calculados en el Capítulo IV. Tras completar la configuración, se realizaron las pruebas correspondientes en el laboratorio de máquinas eléctricas, donde se obtuvieron datos sobre el desempeño del relé.

Protección con un relé

Tras llevar a cabo la práctica con un relé ubicado en la barra A del SEP, se han identificado en la Figura 27 los tiempos de disparo para cada uno de los tres niveles de falla. Esto se realizó a través del software Power Factory DlgSILENT, donde se simuló el SEP y se logró una representación visual clara para observar con precisión los tiempos de disparo en cada situación de falla.

Figura 27

Curva de activación del relé ante fallas de sobrecorriente



La Tabla 16 muestra una comparación entre los valores medidos con los valores calculados en los tiempos de disparo del relé ante diferentes corrientes de cortocircuito, mostrando una discrepancia mínima entre ellos. Esta variación en los tiempos puede atribuirse a la tolerancia

del relé, que está influenciada por fenómenos como la latencia y el muestreo, además de la velocidad de apertura de los contactos y otras variables que generan un bajo error en la respuesta.

Tabla 16

Tiempos medidos y calculados para cada valor de cortocircuito

Falla	Valor medido (ms)	Valor calculado (ms)
I_{sc1}	1491	1434
I_{sc2}	294	282
I_{sc3}	12	0

Los valores medidos tras las fallas provocadas se encuentran detallados en el Anexo 11, donde se presenta el historial de fallas correspondiente a esta práctica. Este documento proporciona una amplia gama de información, incluyendo los niveles de corriente por fase, tiempos de disparo, tiempos de despeje de la falla y otros parámetros relevantes para el análisis de la protección.

Teniendo los tiempos reales de nuestro SEP, podemos observar la mayor desviación se produce en la primera falla, que tiene un nivel de corriente de cortocircuito de 590A, observado desde el lado del primario. Este nivel de corriente actúa bajo la curva de tiempo inverso, con un margen de error de 57 ms comparado con el tiempo calculado observado en la Figura 27. En la segunda falla, que también actúa bajo la curva de tiempo inverso, se registra un nivel de corriente de cortocircuito de 1270A, reflejado en el primario, con una aproximación más exacta, ya que el margen de error es de solo 12 ms. Finalmente, con el nivel de corriente más elevado, entra en juego la unidad instantánea, y se observa un retardo en el disparo de 12 ms.

Estos errores son normales ya que son muy bajos, en sistemas reales estos errores no comprometen la funcionalidad ni la fiabilidad del sistema de protección eléctrica. De esta

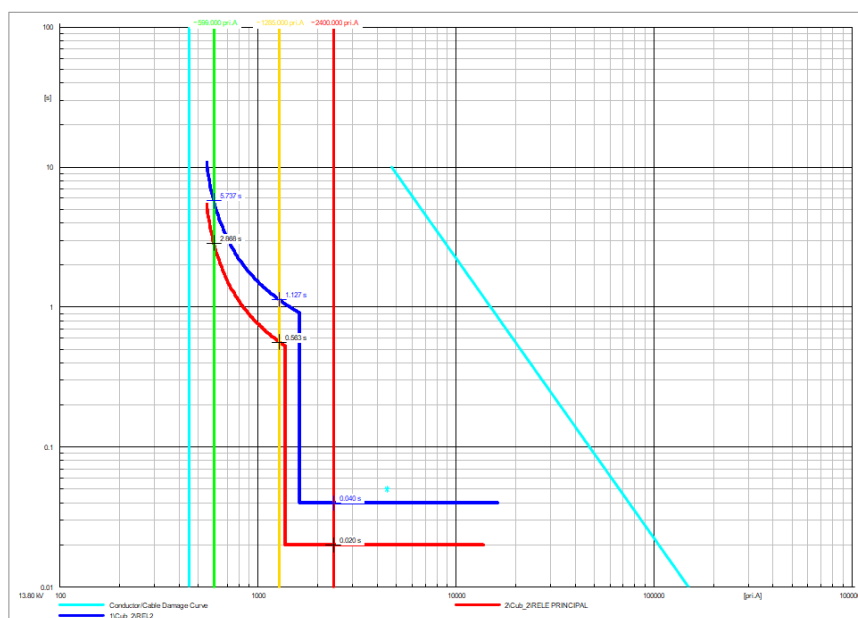
manera se respalda la efectividad del diseño del sistema de protección eléctrica implementado en el laboratorio de máquinas eléctricas y proporciona una base sólida para su aplicación en entornos reales.

Coordinación con dos relés de sobrecorriente

En el caso de la protección de sobrecorriente en cascada con dos relés, el proceso sigue un esquema similar. Comienza con los cálculos teóricos para determinar los parámetros adecuados, seguido del ajuste de estos parámetros en el relé correspondiente. Luego, se procede a simular el SEP utilizando el software Power Factory DigSILENT. Durante esta simulación, se ingresan todos los parámetros relevantes del sistema para obtener la coordinación de protecciones. Las curvas características presentadas en la Figura 28 permiten visualizar cómo interactúan los relés en respuesta a diferentes niveles de falla, proporcionando la información necesaria sobre los tiempos de respuesta de cada dispositivo.

Figura 28

Curvas para coordinación de los 2 relés de sobrecorriente



Nota. En la figura se muestran las curvas para la coordinación de los dos relés en cascada para el SEP simulado.

Los cálculos exactos brindan la posibilidad de tener una buena coordinación, estas protecciones aseguran que el sistema opere de manera óptima y confiable ante diferentes escenarios de falla. En ningún momento las curvas se cruzan o traslapan, bajo condiciones controladas de prueba de falla, no se presentaron falsos disparos en el relé de respaldo.

En la Tabla 16 y 17 se contrastan los resultados obtenidos en la práctica con los cálculos teóricos, tanto para la protección principal como para la de respaldo. Las diferencias entre tiempos pueden atribuirse a diversos factores, como los tiempos de cierre de los contactos, latencia del dispositivo, muestreo y otros fenómenos, que pueden generar variaciones mínimas en los resultados medidos.

Tabla 17

Valores de relé principal de la práctica.

Falla	Valor medido	Valor calculado P. principal
I_{sc1}	3064	2868
I_{sc2}	615	563
I_{sc3}	1	0

Tabla 18

Valores de relé de respaldo de la práctica.

Falla	Valor medido	Valor calculado
		P. secundaria
I_{sc1}	6178	5737
I_{sc2}	1252	1127
I_{sc3}	2	0.02

Los tiempos de disparo para los dos relés, el principal y el de respaldo, muestran un error en la primera falla, con 196 ms en comparación con el tiempo calculado, para el primer relé y 441 ms para el segundo relé, los cuales actúan bajo la curva de tiempo inverso. No obstante, en la falla dos y tres, se observa un error mínimo que puede considerarse despreciable.

Los resultados obtenidos tras el análisis de los tiempos de disparo del relé principal y de respaldo indican que, aunque se observaron diferencias, estas son mínimas en comparación con el buen funcionamiento general del sistema de protección eléctrica. Estas pequeñas variaciones son normales en entornos reales y no afectan significativamente la capacidad del sistema para proteger de manera efectiva el sistema eléctrico. Por lo tanto, se confirma la efectividad del esquema de protecciones implementado y se valida su fiabilidad en la detección y despeje de fallos en el sistema de energía.

Práctica de subfrecuencia para un generador síncrono.

La segunda práctica que se realiza es la de subfrecuencia para un generador síncrono. Es importante destacar que, en primer lugar, se llevaron a cabo los cálculos teóricos pertinentes, tal como se detalla en el Capítulo IV. Estos cálculos proporcionan los parámetros necesarios para la configuración de la protección de subfrecuencia en el generador síncrono. Con el sistema debidamente configurado, se llevaron a cabo pruebas prácticas para evaluar su desempeño y eficacia en condiciones simuladas de fallo. Los resultados obtenidos

proporcionan información crucial sobre la capacidad del sistema para detectar y responder adecuadamente a condiciones de subfrecuencia con el desprendimiento de carga para recuperar estabilidad, lo cual se analizará en detalle a continuación.

En la Tabla 19 se detallan las cargas que se conectaron de forma repentina para inducir una disminución en la frecuencia del sistema. Estas cargas fueron seleccionadas con respecto a la sensibilidad del cambio de frecuencia de la máquina síncrona del laboratorio. Además, las mismas que fueron diseñadas para simular condiciones reales y representativas de situaciones de carga cambiantes en un SEP.

Tabla 19

Cargas trifásicas a desconectar del SEP

Prioridad	Descripción	Potencia
1	Load 1	11.37 W
2	Load 2	12 W
3	Load 3	12.71 W

En la Tabla 20 se presentan los distintos escalones de frecuencia ajustados durante las pruebas de subfrecuencia. Esta tabla permite una comparación directa entre los tiempos de disparo calculados y los tiempos de disparo medidos para cada escalón de frecuencia. Se destaca que, en términos generales, los tiempos de disparo prácticamente coinciden, con errores mínimos que se manifiestan en décimas de segundo. Este nivel de precisión evidencia la efectividad de la protección implementada, particularmente relevante dado que la frecuencia es uno de los parámetros eléctricos más críticos. En este sentido, el relé demuestra una capacidad de respuesta rápida y confiable ante las variaciones en la frecuencia del sistema.

Tabla 20*Escalones de frecuencia medidos y calculados*

Escalones de frecuencia	Tiempo de disparo seleccionado	Tiempo de disparo real
59.4 Hz	0.3 s	0.3 s
58.8 Hz	0.2 s	0.29 s
57.8 Hz	0.0 s	0.187 s

En la Tabla 22 se presenta en orden cronológico los eventos que ocurren cuando existe una perturbación de frecuencia debido a una sobrecarga del sistema, donde se activa la protección de subfrecuencia junto con los EDAC. Aquí se analiza el estado de sobrecarga, las tres frecuencias de Pick-up y los tres estados de desprendimiento de carga, teniendo datos como: el tiempo, la frecuencia del sistema, descripción del evento, el RoCoF y el valor de sobrecarga.

Como se sabe al ocurrir la perturbación la frecuencia baja al primer escalón donde se activa el F1 pick-up del relé, en esta etapa la sobrecarga y la tasa de cambio de frecuencia se mantienen constantes mientras se alcanzan la frecuencia 2 y 3 de Pick-up, por ello la frecuencia sigue disminuyendo con el tiempo hasta que se activan los EDAC previamente ajustados y el RoCoF empieza a disminuir, finalmente se desconectan las tres cargas, aumentando más la frecuencia y recuperando la estabilidad del sistema.

Para el cálculo de los tiempos que transcurren desde que se detectan los valores de Pick-up para frecuencia hasta que se realiza la desconexión de carga, se considera 150 milisegundos en llegar la señal que envía el relé hacia el breaker o disyuntor que abre los contactos, además se debe tomar los tiempos seleccionados para el disparo de cada carga.

Tabla 21

Eventos secuenciales de la práctica de protección de subfrecuencia

Tiempo [seg]	Frecuencia [Hz]	Evento	Tasa de cambio de frecuencia [Hz]	Sobrecarga en el sistema [W]
0.00	60	Sobrecarga en el SEP	-12.685	36.1
0.047	59.4	Pick-up de primer escalón del relé	-12.685	36.1
0.095	58.8	Pick-up de segundo escalón del relé	-12.685	36.1
0.173	57.8	Pick-up de tercer escalón del relé	-12.685	36.1
0.197	57.5	Primer estado de desconexión de carga	-8.69	24.73
0.245	57.08	Segundo estado de desconexión de carga	-4.473	12.73
0.323	56.73	Tercer estado de desconexión de carga	-0.00	0.02

Nota. En la tabla se muestra los resultados calculados de cada evento desde que inicia la perturbación hasta la última desconexión de carga.

Análisis de la oscilografía tras la detección de la falla de subfrecuencia.

A través del software SIGRA, se puede observar con claridad el perfil de frecuencia registrado durante estas pruebas, lo que proporciona una visión detallada de cómo reacciona el generador síncrono ante variaciones en la carga y cómo se ve afectada la frecuencia del

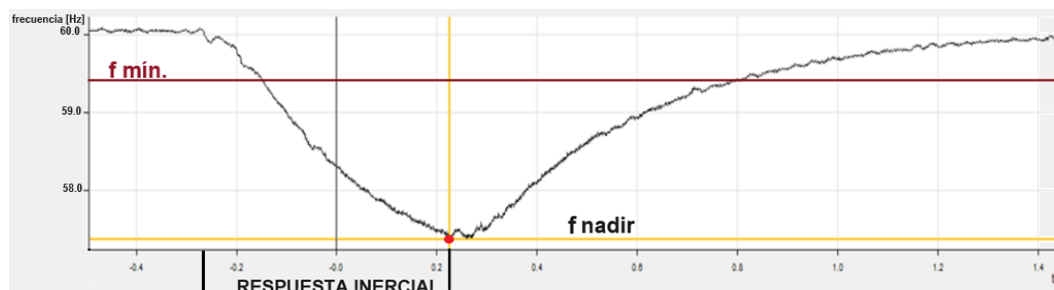
sistema en respuesta a estos cambios imprevistos. Además de resaltar la capacidad de respuesta de la protección de subfrecuencia implementada, este análisis permite identificar el proceso de desconexión de carga necesario para restablecer la frecuencia nominal del sistema.

En las gráficas de perturbaciones resultantes de la práctica de subfrecuencia se observa la curva de frecuencia en función del tiempo, desde que ocurre la contingencia por sobrecarga hasta que se estabiliza muy cerca de la frecuencia nominal. Además, se muestra la curva del RoCoF, frecuencia nadir, la respuesta inercial del generador y la recuperación de la frecuencia al desconectarse cada sobrecarga del sistema.

Al conectar las 3 cargas, el sistema experimenta una frecuencia mínima de 57.3 Hz, lo que significa que la frecuencia mínima alcanzada después de la perturbación supera el umbral de los escalones de subfrecuencia. Esto activa el EDAC, restableciendo así la frecuencia nominal del sistema después de 1.8 segundos desde que se produjo la sobrecarga. Además, se puede observar que la respuesta inercial dura aproximadamente 0.5 segundos, como se presenta en la Figura 29.

Figura 29

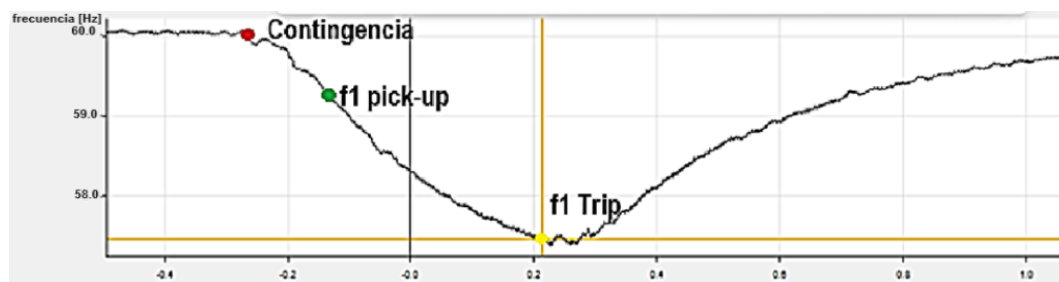
Perturbación de la frecuencia al sobrecargar el sistema



La frecuencia de pick-up para el primer escalón que es de 59.4 Hz se da a los 87 ms de conectar la sobrecarga y luego 0.3 segundos aproximadamente de detectar la frecuencia se genera el desprendimiento de la primera carga, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Primer estado de desconexión de carga

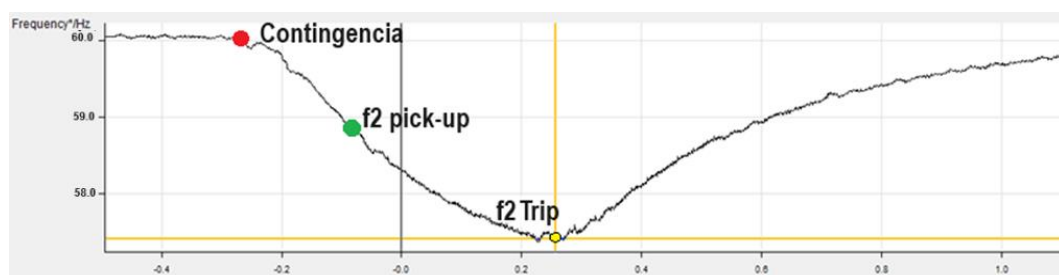


Nota. La figura muestra el punto de la primera desconexión de carga del sistema, mediante la intersección de las líneas amarillas.

La frecuencia de pick-up para el segundo escalón que es de 58.8 Hz se da a los 144 ms de conectar la sobrecarga y luego 0.28 segundos aproximadamente de detectar la frecuencia se da el desprendimiento de la segunda carga, casi al mismo tiempo de la primera desconexión como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Segundo estado de desconexión de carga

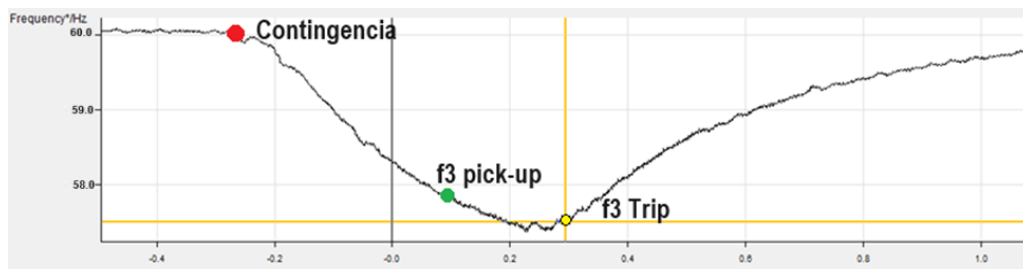


Nota. La figura muestra el punto de la segunda desconexión de carga del sistema, mediante la intersección de las líneas amarillas.

La frecuencia de pick-up para el tercer escalón que es de 57.8 Hz se da a los 210 ms de conectar la sobrecarga y luego 0.17 segundos aproximadamente de detectar esta frecuencia se da el desprendimiento de la tercera carga, como se puede observar en la Figura 31.

Figura 32

Tercer estado de desconexión de carga



Nota. La figura muestra el punto de la tercera desconexión de carga del sistema, mediante la intersección de las líneas amarillas.

La identificación de los tiempos de disparo en cada fase del proceso de desprendimiento de carga revela valores notablemente cercanos a los cálculos predeterminados. Además, a través de las representaciones gráficas, se facilita la percepción e interpretación de parámetros como la frecuencia nadir, la región de respuesta inercial, la curva del RoCoF y la forma en que la frecuencia se restablece al llevar a cabo la desconexión automática de carga. Estos aspectos, que pueden resultar difíciles de discernir únicamente en la pantalla del relé, se vuelven más evidentes mediante el análisis técnico de estas gráficas.

Para el tiempo de disparo en el tercer escalón se tiene más error en comparación con el tiempo del primero y segundo, lo cual es un gran problema a la hora de realizar el EDAC ya que ese pequeño tiempo de retraso hace que la frecuencia nadir sea mucho más baja y de igual manera el tiempo para recuperarse de la perturbación aumenta considerablemente. Este error puede ser debido a que el relé debe medir y procesar varias señales del sistema al mismo tiempo, además del desgaste por el uso continuo que se les ha dado.

Evaluación del grado de satisfacción.

Se realiza una encuesta para validar la efectividad de las guías de protecciones eléctricas, con el fin de obtener datos cuantitativos sobre la aplicación de los conceptos vistos en cátedra, el desarrollo del instructivo y la experiencia real de configurar protecciones eléctricas de potencia.

En esta sección de validación, se analiza la encuesta de satisfacción a una muestra de diez estudiantes tras completar la práctica de sobrecorriente y subfrecuencia. La retroalimentación proporcionada por los estudiantes es fundamental para evaluar la efectividad de la práctica y su impacto en el proceso de aprendizaje, la cual se puede ver con más detalle en el Anexo 12. A través de las respuestas recopiladas, se busca validar si la práctica cumplió con sus objetivos educativos y si fue percibida como útil y enriquecedora por parte de los estudiantes.

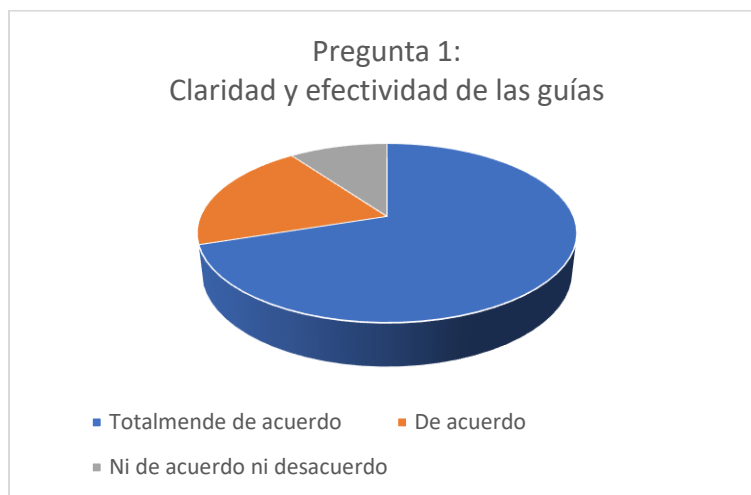
Tabla 22

Resultados de la pregunta 1

¿Consideras que las guías proporcionadas fueron claras y fáciles de entender para llevar a cabo las prácticas de manera efectiva?		
	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente de acuerdo	7	70%
De acuerdo	2	20%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	1	10%
En desacuerdo	0	0%
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Total	10	100

Figura 33

Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 1

**Análisis**

Basándonos en los resultados de la encuesta, el 70% de los encuestados expresaron estar "totalmente de acuerdo" en que las guías proporcionadas fueron claras y fáciles de entender para llevar a cabo las prácticas de manera efectiva. Además, el 20% estuvo "de acuerdo", mientras que el 10% restante respondió "Ni de acuerdo ni en desacuerdo". Esto sugiere que la gran mayoría de los estudiantes percibieron las guías como herramientas útiles y comprensibles para realizar las prácticas de forma adecuada.

Interpretación

Los resultados indican que la mayoría de los estudiantes consideraron las guías proporcionadas como claras y fáciles de entender para llevar a cabo las prácticas de protecciones eléctricas de manera efectiva. Este alto porcentaje de respuestas "totalmente de acuerdo" sugiere que las guías fueron bien recibidas y cumplían el propósito de orientar a los estudiantes durante la realización de las prácticas. La minoría que expresó estar "de acuerdo" también respalda esta percepción positiva. Sin embargo, es importante considerar las respuestas "ni de

acuerdo ni en desacuerdo", que podrían indicar que algunos estudiantes podrían haber tenido dificultades menores con las guías o que podrían sugerir áreas de mejora en la claridad o la presentación de las instrucciones.

Es evidente que existe una base sólida con la mayoría de los estudiantes expresando una comprensión clara y efectiva de las guías proporcionadas. Sin embargo, este análisis también resalta la importancia de ser minucioso y detallado al elaborar las guías, particularmente en áreas donde algunos estudiantes pudieron haber experimentado confusiones. Estos resultados nos instan a revisar y mejorar las guías existentes, enfocándonos en analizar cualquier aspecto que pueda haber sido motivo de confusión para algunos estudiantes, con el objetivo de garantizar una comprensión sólida y uniforme de los procedimientos de laboratorio.

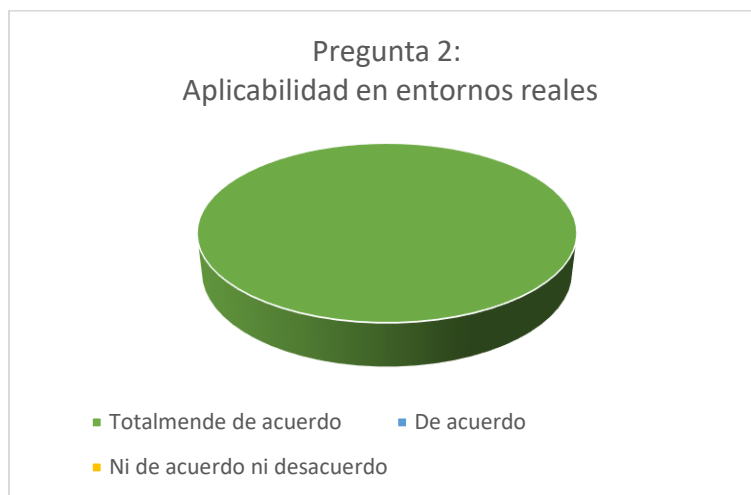
Tabla 23

Resultados de la pregunta 2

¿Consideras que estas prácticas te proporcionaron una experiencia más cercana a la realidad de las aplicaciones de protecciones eléctricas en entornos laborales?		
	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente de acuerdo	10	100%
De acuerdo	0	0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	0	0%
En desacuerdo	0	0%
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Total	10	100

Figura 34

Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 2

**Análisis**

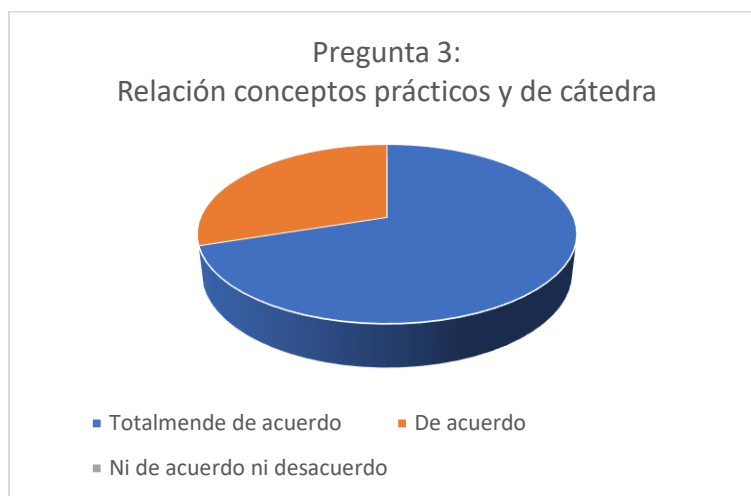
La encuesta sobre la pregunta 2 revela que el 100% de los estudiantes están totalmente de acuerdo en que las prácticas proporcionan experiencia para aplicar las protecciones de sobrecorriente y subfrecuencia en un entorno laboral.

Interpretación

El hecho de que el 100% de los encuestados haya respondido "totalmente de acuerdo" sugiere que las prácticas proporcionaron una experiencia altamente valiosa y significativa para los estudiantes. Esta alta tasa de acuerdo se da ya que se trabaja con equipos Siemens, altamente utilizados en la industria eléctrica, lo cual indica que las prácticas fueron efectivas para sumergir a los estudiantes en situaciones realistas relacionadas con las protecciones eléctricas. Brindando una experiencia práctica que les ayudará a estar mejor preparados para enfrentar desafíos en su futura carrera profesional en la rama eléctrica.

Tabla 24*Resultados de la pregunta 3*

¿Consideras que las prácticas de sobrecorriente y subfrecuencia contribuyeron a una comprensión más profunda de los fenómenos teóricos abordados en la cátedra sobre protecciones eléctricas?		
	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente de acuerdo	7	70%
De acuerdo	3	30%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	0	0%
En desacuerdo	0	0%
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Total	10	100

Figura 35*Gráfica tipo pastel para los resultados de la pregunta 3*

Análisis

En base a los resultados de la pregunta 3 de la encuesta, el 70% de los encuestados expresaron estar "totalmente de acuerdo" y el 30% estuvo "de acuerdo" en que las prácticas contribuyeron a una comprensión más profunda de los conceptos teóricos abordados en cátedra sobre protecciones eléctricas.

Interpretación

Los resultados muestran que la mayoría de los estudiantes están "totalmente de acuerdo" considerando que se aclararon todos los temas tratados en cátedra para la protección de sobrecorriente y subfrecuencia, sin embargo, es importante tener en cuenta que un pequeño porcentaje de estudiantes respondió "de acuerdo", lo que sugiere que algunos estudiantes pueden haber experimentado una mejora menos significativa en su comprensión. Esto podría atribuirse a diversas razones, como niveles de experiencia previa al tratarse de equipos SIPROTEC, donde los estudiantes no han tenido un acercamiento previo. En consecuencia, estos resultados señalan que la práctica ayuda a entender de mejor manera los fenómenos eléctricos, pero sin quitar la importancia de seguir evaluando y ajustando las prácticas para garantizar que satisfagan las necesidades de todos los estudiantes y maximicen su efectividad en el aprendizaje.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La creación exitosa del módulo representa un avance significativo en el desarrollo de recursos didácticos para la enseñanza y comprensión de conceptos de protecciones eléctricas. Este módulo proporciona a los estudiantes la oportunidad de experimentar de manera práctica los principios fundamentales de las protecciones eléctricas, permitiéndoles aplicar sus conocimientos teóricos en un entorno controlado y realista.

Para construir el módulo de protecciones eléctricas basado en los relés SIPROTEC 7SJ62 de Siemens, se llevó a cabo un diseño detallado, seguido de cálculos y simulaciones para validar su funcionamiento. Este proceso incluyó cálculos precisos para la selección de resistencias y equipos, asegurando un funcionamiento óptimo y confiable para su uso en el laboratorio de máquinas eléctricas. Con estas etapas completadas, se consiguió desarrollar un módulo completamente funcional que permite simular fenómenos eléctricos, aplicando las protecciones de sobrecorriente (50/51) y subfrecuencia (81).

Tras analizar los tiempos de disparo medidos contrastándolos con los calculados se deduce que el módulo tiene un alto grado de fiabilidad, ya que los valores concuerdan en su mayoría y en algunos casos tienen una tasa de error muy pequeña, además tenemos la posibilidad de observar las oscilografías donde se analizan las perturbaciones de manera gráfica las cuales están muy cercanas a casos de estudio reales. Lo cual asegura la confiabilidad y replicabilidad de los fenómenos eléctricos simulados bajo condiciones controladas en el módulo.

Las guías de laboratorio están meticulosamente diseñadas, ofreciendo instrucciones detalladas y validadas que simplifican la ejecución de cada práctica de manera eficiente y sin dificultades significativas. Aquí, los estudiantes realizan ejercicios prácticos, ajustando los parámetros en el relé y comparando los resultados obtenidos con los parámetros teóricos calculados. La metodología no solo facilita la comprensión de los conceptos teóricos, sino que también proporciona una experiencia práctica. De esta manera, los estudiantes pueden aprovechar al máximo las oportunidades de aprendizaje práctico, lo que les brinda una formación más completa y los prepara de manera más efectiva para enfrentar los desafíos del mundo laboral en el campo de la ingeniería eléctrica.

Recomendaciones

Identificar escenarios replicables en el módulo en cuanto a otras funciones disponibles en los relés y desarrollar una expansión con nuevas prácticas, asegurándose de que estén alineadas con los objetivos de la carrera y que proporcionen una experiencia de aprendizaje significativa y relevante para los estudiantes.

Se recomienda revisar el manual SIPROTEC 7SJ62 y tener un acercamiento previo con el software DIGSI, obteniendo mayor conocimiento y habilidad en el manejo de los programas que se emplean en la configuración del relé, para mejorar la fluidez de las prácticas.

Implementar la comunicación entre los relés, para aumentar la velocidad al momento de cargar las configuraciones hacia el relé y descargar los resultados de las prácticas almacenados en el equipo de protección.

Bibliografía

- Alderete, J. (s.f.). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/189444501/Calculo-de-Fallas-Simetricas>
- Anderson, j. (1998). *POWER SYSTEM PROTECTION*. Series Editorial Advisory Committe.
- Argüello, G., & Carchipulla, C. (2015). *Dspace.ucuenca.edu.ec*. Obtenido de Universidad de Cuenca: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21657/1/tesis.pdf>
- Barberán, F., & Suárez, M. (2017). Diseño y construcción de un módulo didáctico de protecciones de redes de distribución en sistemas eléctricos de potencia . *Tesis de grado*.
- Cabrera, M. (29 de Enero de 2021). *Dspace.ucuenca.edu.ec*. Obtenido de Universidad de Cuenca:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35604/1/Trabajo%20de%20titulacion.pdf>
- Electricity, E. N. (2020). Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF) . *Entsoe*, 8.
- Encalada, K., & Tonato, M. (9 de Marzo de 2023). *Dspace.UPS.edu.ec*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24673/1/UPS-GT004267.pdf>
- Gonzalés, C. (25 de 8 de 2020). *oocities*. Obtenido de <https://www.oocities.org/stselectricos/clase3.pdf>
- Gutierrez, L. (2016). *Desarrollo de un prototipo de un revelador*.
- Hatziargyriou, N., Milanovic, J., Rahmann, C., Ajarapu, V., Canizares, C., Erlich, I., . . . Cutsem, T. (2021). Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 36(4), 3271-3280.

- Heredia, C. (Febrero de 2011). *Bibdigital.epn.edu.ec*. Obtenido de Escuela Politecnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3756/1/CD-3549.pdf>
- Jhon Grainger, W. S. (1996). *Analisis de sistemas de potencia*. Mexico: McGraw -Hill.
- Juan Gers, E. H. (2011). *Protection of Electricity Distribution Networks*. Reino Unido: MPS Ltd.
- Legrand. (2020). LOGICAL SELECTIVITY. *THE GLOBAL SPECIALIST IN ELECTRICAL AND DIGITAL BUILDING INFRASTRUCTURES* , 3.
- López, A. (2015). Análisis de alivio de carga por baja frecuencia aplicando a sistemas aislados con energía renovable para minimizar el rango de cambios de frecuencia . *Tesis de Grado*.
- Marín, A. (2003). Estudio y coordinación de protecciones de sobrecorriente del Sistema Eléctrico de Petroproducción utilizando relés digitales. *EPN*.
- Mejía, J., & Ollague, H. (2012). Estudio para la coordinación de protecciones mediante selectividad lógica para los centros de fuerza de la Central Molino, Presa Daniel Palacios y central Mazar de la empresa CELEC Hidropaute . *Tesis de grado*.
- Núñez, O. (2018). *SISTEMA DE PROTECCIÓN ADAPTATIVO PARA MICRO-REDES*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Ocampo, J. (2019). *Repositorio.unal.edu.ec*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76108/1053840496.2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Ortiz, D. (2023). *Propuesta metodológica para el análisis de estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia con baja inercia*. Universidad de Chile.

Pérez, E. (1 de Mayo de 2017). *autoreseditores.s3.amazonaw*. Obtenido de Eddie Pérez:

https://autoreseditores.s3.amazonaws.com/book_preview/pdf/000003286.pdf?16168469

21

Saavedra, R. (2021). *Repositorio.ucv.edu.ec*. Obtenido de Universidad Cesar Vallejo:

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/76424/Saavedra_URC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Shokoo, F., & Dai, J. (2005). Intelligent Load Shedding Need for a Fast and Optimal Solution. *IEEE PCIC Europe*, 2.

Siano, P. (2014). Demand response and smart grids—A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.30, 461-478.

Triviño, F., & Burgos, J. (1 de Septiembre de 2017). *Archivo.UC3M*. Obtenido de Universidad

Carlos III de Madrid: <https://e->

[archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28663/TFG_Beatriz_DelPino_Sanchez_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28663/TFG_Beatriz_DelPino_Sanchez_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Vega, B. (2021). *ESTRATEGIAS Y MODOS DE CONTROL DE CONVERTIDORES PARA LA REGULACIÓN DE FRECUENCIA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN INERCIA*.

Santiago de Chile: Universidad de Chile.

ANEXOS