

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA Y DE PROTECCIONES PARA LA BANCADA EXPERIMENTAL DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE PROPULSIÓN DISTRIBUIDA (DP) DEL PROYECTO PIMI-1801

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA

González Ortiz Victor Alexander

victor.gonzalez01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ALEX FABRICIO OÑA ÑACATA, MSC.

alex.ona@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO, MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr González Ortiz Victor Alexander como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA, bajo nuestra supervisión:

**Ing. Alex Fabricio Oña
Ñacata.**

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Carlos Orlando Romo Herrera.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo González Ortiz Victor Alexander con CI: 171993943-9 declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, soy titular de la obra en mención y otorgo una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entrego toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Victor González Ortiz

CI: 171993942-9

Teléfono: 0999928002

Correo: victor.gonzalez01@epn.edu.ec

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a los profesionales ávidos de conocimiento que integran al grupo de investigación ATA de la facultad de ingeniería mecánica de la EPN. Que este proyecto sea un soporte para el desarrollo del proyecto PIMI-1801.

AGRADECIMIENTO

Agradezco enormemente a mi familia y en especial a mis padres, por el apoyo prestado en el transcurso de esta etapa.

Agradezco al grupo de investigación ATA, precedido por el Dr. Esteban Valencia, Dr. Edgar Cando y Dr. Marcelo Pozo, por brindarme la oportunidad de aportar y realizar mi proyecto de grado dentro del proyecto PIMI-1801.

Agradezco a mis amigos: Iván Changoluisa, Victor Alulema y Darío Rodríguez, por el apoyo incondicional y confianza en el desarrollo de las actividades del GI-ATA.

Agradezco a mis amigos del grupo de ecua voley, por los momentos de juego que tuvimos en las canchas de la EPN.

Agradezco a Alex Oña, mi director de tesis, por la amistad y confianza prestada en mi periodo estudiantil.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Objetivo general	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Fundamentos	2
	Arquitectura de UAV de propulsión híbrida en serie	4
	Grupo electrógeno	5
2	Metodología	7
2.1	Descripción de la metodología usada	7
3	Resultados y Discusión	10
3.1	Realizar el estudio de los requerimientos y condiciones para la bancada experimental.....	12
	Evaluación del área de la instalación eléctrica	12
	Estudio de requerimientos de protecciones eléctricas.....	14
3.2	Realizar el estudio de la carga proyectada	16
	Grupo electrógeno	17
	Controlador lógico programable	20
	Motor eléctrico sin escobillas	21
	Rectificador trifásico programable	22
3.3	Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de fuerza	24
	Protecciones eléctricas del circuito de fuerza	27
	Accionamiento electromecánico del circuito de fuerza	32
	Elementos de mando del circuito de fuerza.....	33
	Elementos de medida del circuito de fuerza	33
	Dimensionamiento del conductor (Tablero TP-T1- Tablero de fuerza).....	34
	Dimensionamiento de conductores de los rectificadores trifásicos	37
	Selección del gabinete para el circuito de fuerza	38
3.4	Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de distribución....	39

Protecciones eléctricas del circuito de distribución.....	41
Accionamiento electromecánico del circuito de distribución.....	42
Bus de corriente continua.....	44
Conductores eléctricos del circuito de distribución.....	45
Selección del gabinete para el circuito de distribución.....	45
3.5 Realizar el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT).....	45
Resistividad del terreno.....	49
Modelado del terreno.....	52
3.6 Realizar un manual de implementación.....	54
Instalación del alimentador desde el tablero TP-T1 (Existente).....	54
Alimentación de los rectificadores programables trifásicos.....	59
Conexión del rectificador con el bus de corriente continua.....	61
4 Conclusiones y Recomendaciones.....	62
4.1 Conclusiones.....	62
4.2 Recomendaciones.....	63
5 Referencias Bibliográficas.....	64
ANEXOS.....	67
Anexo 1: Certificado de PARTICIPACIÓN.....	i
Anexo 2: Planos y Esquemas.....	ii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Arquitectura híbrida en serie de un UAV.	4
Figura 1.2: Diseño conceptual del banco de pruebas	5
Figura 1.3 Diagrama de bloques del sistema de control del grupo electrógeno.	6
Figura 2.1 Metodología desarrollada	7
Figura 3.1 Representación 3D de la ubicación física de los tableros eléctricos y la bancada experimental.....	11
Figura 3.2: Tablero principal TP-T1	12
Figura 3.3 Recorrido de los conductores eléctricos desde el tablero TP-T1 hasta el tablero del circuito de fuerza.....	14
Figura 3.4 Ubicación de rectificadores en la bancada experimental	23
Figura 3.5. Características funcionales del rectificador trifásico programable	23
Figura 3.6 Diagrama unifilar del circuito de fuerza.....	26
Figura 3.7 Diagrama unifilar del circuito de distribución.....	40
Figura 3.8 Diagrama esquemático de la puesta a tierra	46
Figura 3.9 Método de los 3 polos	48
Figura 3.10 Distancia entre electrodos del 62% utilizando el método de los 3 polos ..	48
Figura 3.11 Medición de resistencia de la puesta a tierra.....	49
Figura 3.12 Método de Wenner	49
Figura 3.13 Medición de resistividad utilizando el método de Wenner	50
Figura 3.14 Medición de resistencia dirección 1	51
Figura 3.15 Medición de resistencia dirección 2	51
Figura 3.16 Sustrato mejorador de terreno	53
Figura 3.17 Laboratorio de transferencia de calor	54
Figura 3.18 Tablero principal TP-T1	55
Figura 3.19 Disyuntor termomagnético de 100 A.....	55
Figura 3.20 Recorrido del alimentador	56
Figura 3.21 Recorrido de conductores por el área de los laboratorios de la FIM	56
Figura 3.22 Parte interna del tablero de fuerza.....	57
Figura 3.23 Parte externa del tablero de fuerza.....	58
Figura 3.24 Tablero de distribución.....	59
Figura 3.25 Rectificador programable trifásico	59
Figura 3.26 Alimentación del rectificador trifásico.....	60
Figura 3.27 Conexión de la salida de voltaje CC.	61
Figura 3.28 Conexión bus de DC	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Descripción de los elementos de la bancada experimental.....	11
Tabla 3.2	Circuitos derivados del tablero principal.....	13
Tabla 3.3	Especificaciones del motor de combustión interna	17
Tabla 3.4	Especificaciones alternador eléctrico	18
Tabla 3.5	Especificaciones del regulador automático de voltaje	19
Tabla 3.6	Especificaciones del regulador de velocidad	20
Tabla 3.7	Especificaciones del PLC	21
Tabla 3.8	Especificaciones del motor eléctrico sin escobillas	22
Tabla 3.9	Especificaciones del rectificador trifásico	24
Tabla 3.10	Simbología y descripción del circuito eléctrico de fuerza	27
Tabla 3.11.	Protecciones termomagnéticas del rectificador trifásico.....	29
Tabla 3.12.	Protección termomagnética del circuito de fuerza	29
Tabla 3.13	Protección termomagnética del conductor de derivación del tablero TP-T1	30
Tabla 3.14	Protección diferencial	31
Tabla 3.15	Relé multifunción de protección de tensiones trifásicas	31
Tabla 3.16	Categoría de empleo de contactores en AC	32
Tabla 3.17	Contactador del circuito de fuerza	33
Tabla 3.18	Medidor digital de voltaje y amperaje	34
Tabla 3.19	Calibre de conductor según el amperaje que soportan	35
Tabla 3.20	Grados IP de protección de tableros	39
Tabla 3.21	Simbología y descripción del circuito de descripción	40
Tabla 3.22	Protección termomagnética del bus de corriente continua.....	42
Tabla 3.23	Categoría de empleo de contactores en DC.	43
Tabla 3.24	Contactador del bus de corriente continua.....	44
Tabla 3.25	Barras de cobre según su amperaje	44
Tabla 3.26	Valores recomendables de resistencia de puesta a tierra.....	46
Tabla 3.27	Telurómetro AEMC modelo 4620	47
Tabla 3.28	Medición de resistencia	50
Tabla 3.29	Elementos conformantes del tablero de fuerza	57
Tabla 3.30	Elementos conformantes del tablero de distribución	58
Tabla 3.31	Puertos de comunicación del rectificador trifásico.....	60

RESUMEN

El presente proyecto de titulación, “DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA Y DE PROTECCIONES PARA LA BANCADA EXPERIMENTAL DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE PROPULSIÓN DISTRIBUIDA (DP) DEL PROYECTO PIMI-1801”, tiene como objetivo realizar el diseño de las instalaciones eléctricas en bajo voltaje para la implementación de la bancada experimental del proyecto PIMI-1801, en la cual se dimensionó sus dispositivos de protección, accionamiento, medición, conductores eléctricos, siguiendo los lineamientos dados por la normativa técnica vigente (NEC) y para la puesta a tierra se tomó como referencia los lineamientos dados por norma IEEE 80. En base al estudio realizado, el presente proyecto está compuesto por cuatro capítulos, los cuales se describen a continuación:

El capítulo uno presenta al proyecto, mediante una introducción y un resumen del mismo al describir la necesidad del diseño del sistema de alimentación eléctrica para la bancada experimental. Se presentan los objetivos, los cuales señalan las actividades que se desarrollaron en el proyecto y por último se tiene los fundamentos, los cuales describen los temas y recursos requeridos para desarrollar el diseño eléctrico.

El capítulo dos expone la metodología utilizada, a través de la fundamentación de la investigación aplicada y exploratoria. Las cuales permitieron la resolución del problema con la aplicación directa de los conocimientos técnicos, por lo que se elaboró un esquema que represente el flujo de desarrollo del proyecto.

El capítulo tres expone los resultados obtenidos, cumpliendo las necesidades y requerimientos de alimentación eléctrica, teniendo a consideración las caídas de tensión en los conductores y las disposiciones mínimas de seguridad impuestas por la normativa técnica.

El capítulo cuatro expone las conclusiones y recomendaciones obtenidas en base a los resultados del proyecto.

PALABRAS CLAVE: Instalaciones eléctricas, control industrial, protecciones eléctricas, sistemas aéreos no tripulados, sistemas energéticos

ABSTRACT

The present degree project, "DESIGN OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY AND PROTECTION SYSTEM FOR THE EXPERIMENTAL BENCH OF HYBRID SYSTEMS OF DISTRIBUTED PROPULSION (DP) OF THE PIMI-1801 PROJECT", has the objective of designing the low voltage electrical installations for the implementation of the experimental bench of the PIMI-1801 project, in which its protection devices, drive, measurement and electrical conductors were dimensioned, following the guidelines given by the current technical standards (NEC) and for grounding, the guidelines given by the IEEE 80 standard were taken as a reference. Based on the study carried out, the present project is composed of four chapters, which are described below:

Chapter one introduces the project through an introduction and a summary of the project describing the need for the design of the power supply system for the experimental bench. The objectives are presented, which point out the activities that were developed in the project and finally there are the fundamentals, which describe the topics and resources required to develop the electrical design.

Chapter two presents the methodology used, through the rationale of the applied and exploratory research. These allowed the resolution of the problem with the direct application of technical knowledge, so a scheme was developed to represent the flow of the project development.

Chapter three presents the results obtained, fulfilling the needs and requirements of electric power supply, taking into consideration the voltage drops in the conductors and the minimum safety provisions imposed by the technical regulations.

Chapter four presents the conclusions and recommendations obtained based on the results of the project.

KEYWORDS: Electrical installations, industrial control, electrical protection, unmanned aerial systems, energy systems.

1 INTRODUCCIÓN

A finales del 2017, la Comisión de Investigación y Extensión del Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social (VIPS), conformó al grupo de investigación de Aeronáutica y Termo-fluidos Aplicada (GI-ATA) como parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica, enfocados al estudio de plataformas aéreas no tripuladas [1]. Gracias a los resultados obtenidos en el estudio e investigación de esta tecnología se ha logrado desarrollar proyectos de carácter científico y técnico sobre plataformas aéreas enfocadas en el cuidado medio ambiental. En este contexto, el GI-ATA a través del proyecto PIMI-1801, resultó favorecido al realizar una propuesta de investigación que involucra la implementación de una bancada experimental para la evaluación de tecnologías de propulsión distribuida aplicadas a sistemas híbridos para aeronaves no tripuladas de tipo ala fija.

El proyecto de investigación PIMI 18-01 presenta como uno de sus objetivos el diseñar e implementar un banco de pruebas para la evaluación experimental de sistemas híbridos de propulsión con un tiempo de duración de 2 años en la cual, en su primer año, personas afines al grupo realizaron la investigación pertinente para seleccionar un motor de combustión interna que cumpla con los requisitos fundamentales de costo y beneficio, por lo que a partir de este motor, el cual es parte de un grupo electrógeno, se realizó el estudio pertinente, objeto de este proyecto de titulación, el cuál es un componente fundamental del estudio técnico desarrollado para el proyecto PIMI-1801, mismo que establece el diseño de un sistema de alimentación eléctrica en bajo voltaje, para el suministro y abastecimiento de energía eléctrica para la bancada experimental. Es importante mencionar, que dentro del presente proyecto se consideraron las tensiones en corriente alterna (CA) por parte del alimentador eléctrico y el grupo electrógeno, las cuales serán llevadas a un tablero eléctrico denominado "Tablero de fuerza", el cual alimentará a los equipos que requieren de una alimentación de 220 (V_{AC}), como es el caso de los convertidores AC/DC trifásicos KEYSIGHT, energizados a través de las ramas auxiliares correspondientes al grupo electrógeno o al alimentador eléctrico.

También se especificó una red en corriente continua (CD) en la salida de los convertidores AC/DC, en el cual la potencia en corriente continua será conducida de igual manera a un tablero eléctrico denominado "Tablero de distribución". El cual capta la energía a través de bus en CD y energiza a un controlador electrónico de velocidad (ESC) para posteriormente alimentar a un motor eléctrico sin escobillas (BL). Se dimensionaron los equipos de protección, accionamiento electromecánico, instrumentos

de medición, conductores eléctricos y protección de puesta a tierra, mediante la aplicación de criterios técnicos y la normativa eléctrica vigente (NEC) [2], los cuales garantizan una correcta operación, confiabilidad, seguridad y robustez al usuario/operador y a los equipos que lo conforman, estableciendo un dimensionamiento bien estructurado e identificado que facilite su futura instalación dentro del galpón de los laboratorios de la FIM (ex Universal), en el área del laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Los documentos entregables del proyecto se incluyen en la sección de anexos, en el cual el ANEXO 1 es un certificado que avala el estudio técnico realizado en el presente proyecto de titulación de acuerdo con las necesidades y requerimientos identificados durante el estudio, el cual fue entregado al Dr. Edgar Cando en calidad de director del proyecto de investigación PIMI-1801. El ANEXO 2 detalla los esquemas desarrollados del diseño eléctrico de la bancada experimental.

1.1 Objetivo general

Diseñar el sistema de alimentación eléctrica y de protecciones para la bancada experimental de sistemas híbridos de propulsión distribuida (DP) del proyecto PIMI-1801.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar el estudio de los requerimientos y condiciones eléctricas para la bancada experimental.
- Realizar el estudio de carga proyectada.
- Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de fuerza.
- Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de distribución.
- Realizar el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT).
- Realizar un manual de implementación.

1.3 Fundamentos

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) son plataformas áreas autónomas sin tripulación humana en su interior y que son capaces de mantenerse en vuelo controlado debido a la aerodinámica propia de la aeronave y la propulsión que ejercen sus motores ya sea eléctricos o de combustión. Los UAVs se han convertido en una gran innovación gracias a la versatilidad que presentan para realizar diferentes actividades enfocados a

recopilación de datos de forma remota. Entre sus principales aplicaciones destaca la exploración, monitoreo ambiental, seguridad aérea, vigilancia, rescate, etc.

La importancia de estudio y de investigación de los UAVs en Ecuador radica en la búsqueda y la fomentación de la independencia tecnológica del país, en un área poco explorada y desarrollada como es el uso de plataformas de ala fija para el monitoreo y gestión ambiental en regiones altoandinas (4000 msnm) [1] en la cual se emplea herramientas de diseño directo e inverso que permiten establecer metodologías más robustas para el diseño de prototipos de aeronaves adaptadas a las condiciones de operación y necesidades locales. Además, es importante mencionar que la mejora en la eficacia y el rendimiento de las aeronaves crea oportunidades potenciales para explorar diversos fenómenos físicos con sensores remotos, que a su vez reducen costos y mejoran las capacidades de acción ambiental.

Por lo tanto, considerando las oportunidades existentes en el cuidado, gestión y monitoreo medioambiental, las tecnologías de propulsión de los UAVs como son: combustión, eléctrico e híbrido radican un importante factor para desarrollar tecnologías adaptables localmente. En primer lugar, la propulsión mediante combustión no sería un sistema óptimo para actividades que involucren una gestión y monitoreo medio ambiental, debido principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero y el ruido generado producto de la combustión del motor, el cual tendría un impacto negativo en los ecosistemas [3].

La propulsión eléctrica por su lado sería una solución potencial para lograr reducciones y minimizar el uso de combustible fósil, sin embargo, la tecnología actual de las baterías limita enormemente la autonomía y el alcance que se generaría en acciones de monitoreo [4]. Por lo tanto, una solución eficaz, razonable y prometedora es la integración de sistemas de propulsión híbrida pues generarían una mejora de rendimiento y eficacia en el sistema de energía, al incorporar dos sistemas energéticos, y además permitiría una reducción de los gases de efecto invernadero hacia el ambiente el cual es un tema relevante en todos los campos de investigación de hoy en día y más aún cuando se trata de monitoreo y gestión medioambiental [4]. De esta manera, el grupo de investigación ATA se encargó de realizar los estudios de investigación pertinentes para tomar como referencia de diseño una arquitectura de hibridación que se detalla a continuación.

Arquitectura de UAV de propulsión híbrida en serie

La arquitectura en serie combina dos o más fuentes de energía para mejorar el rendimiento del sistema, como se indica en la Figura 1.1. La potencia del motor de combustión se convierte en energía eléctrica a través de un alternador, la cual a través de un conversor DC/DC puede ser almacenado en una batería mediante un proceso de carga. El conversor a su vez entrega la energía eléctrica en continua a un motor eléctrico impulsando a la hélice que se encuentre en su eje. El sistema eléctrico híbrido en serie es una arquitectura que permite fácilmente lograr una propulsión eléctrica distribuida [3].

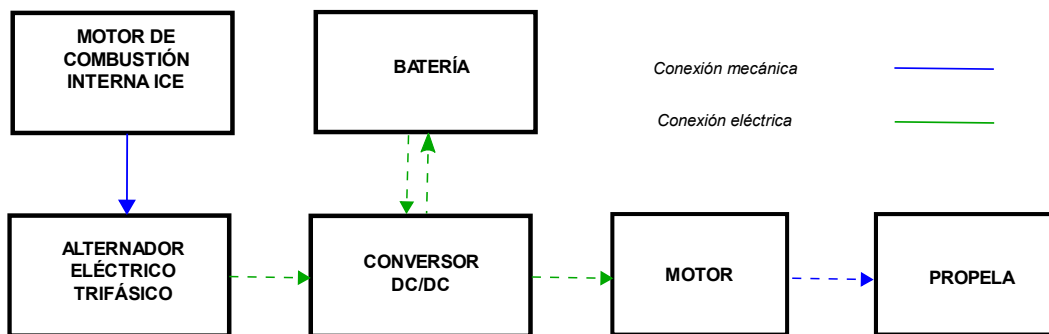


Figura 1.1 Arquitectura híbrida en serie de un UAV.

Tomando como referencia esta arquitectura, se establecieron los requerimientos de equipos y elementos que permiten incorporar la tecnología híbrida. De esta manera, se especificó un modelo de diseño preliminar el cual se conforma de tres sistemas principales:

- **Sistema de control central:** Conformado por un controlador lógico programable (PLC), sus módulos de control y una interfaz HMI. Este sistema se encarga de la supervisión y control de la hibridación de la bancada experimental. Se encuentra alimentado por corriente alterna monofásica.
- **Sistema de alimentación eléctrica:** Conformado por el grupo electrógeno (motor-alternador), la red de alimentación eléctrica que proporcionarán corriente alterna trifásica a los rectificadores de cada rama. Este sistema se encarga de proveer la potencia y energía eléctrica necesaria para accionar el sistema de propulsión eléctrica.
- **Sistema de propulsión eléctrica:** Conformado por el bus de corriente continua, controlador electrónico de velocidad (ESC), un motor eléctrico sin escobillas y una hélice. Este sistema se encarga de captar la energía proveniente de los rectificadores trifásicos al bus de DC, y transmitir potencia a la hélice acoplada al motor eléctrico sin escobillas.

En la Figura 1.2, se observa el diseño conceptual de la bancada experimental.

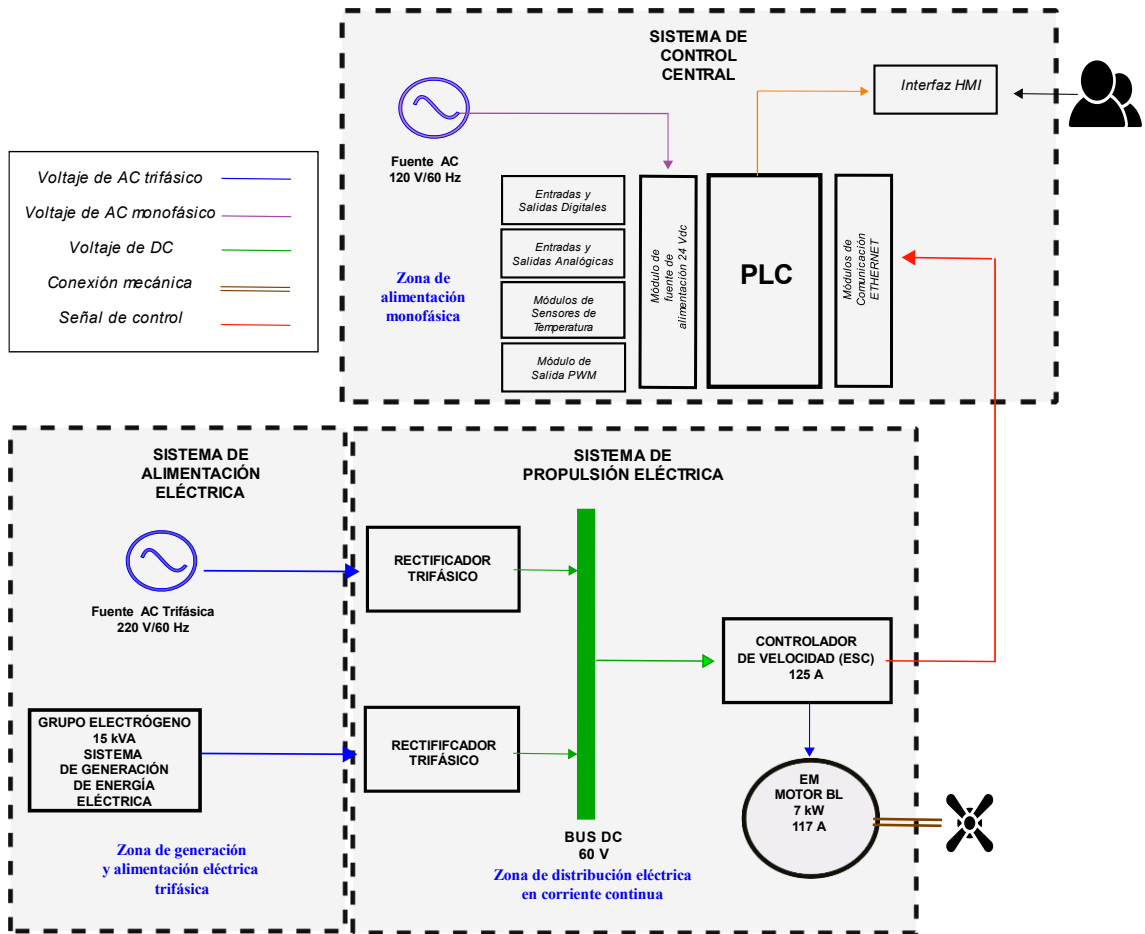


Figura 1.2: Diseño conceptual del banco de pruebas

Teniendo en consideración el esquema, se definieron los requerimientos de diseño y dimensionamiento de un sistema de alimentación, protección, medición y accionamiento eléctrico, tomando a consideración parámetros de selección que cumplan con los requerimientos del proyecto PIMI-1801. En este contexto, se toma como principal protagonista al equipo de generación de energía eléctrica el cual se detalla a continuación.

Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno es un equipo de generación eléctrica que se encuentra conformado por un alternador eléctrico y un motor de combustión interna en su etapa de potencia y un regulador de voltaje y de velocidad en su etapa de control [5].

En su etapa de potencia, el motor de combustión interna se encarga de realizar el movimiento de rotación mecánica y transmitirlo al eje del rotor del alternador a través de un acople mecánico, mientras que el alternador eléctrico es el elemento encargado de suministrar la energía eléctrica trifásica a través del movimiento de rotación realizado por el motor de combustión interna, y entregarlo a las cargas que se encuentran en las líneas de alimentación del alternador.

En su etapa de control, el grupo electrógeno posee un regulador de velocidad (Gobernador) que se encarga de mantener los niveles de frecuencia y velocidad dentro de sus valores nominales, y un regulador automático de voltaje (AVR), encargado de regular la tensión de salida [6]. Estos mecanismos son modulares en forma de tarjetas electrónicas que realizan su acción de control sobre un punto específico de operación del grupo electrógeno, como se indica en la Figura 1.3.

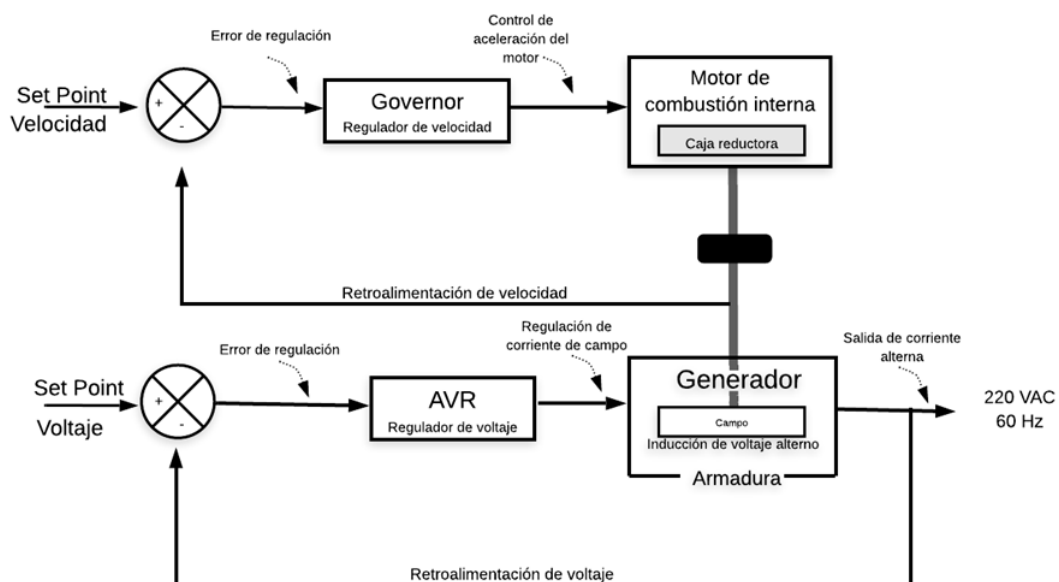


Figura 1.3 Diagrama de bloques del sistema de control del grupo electrógeno.

El grupo electrógeno es un componente principal que integra a la bancada experimental y alimenta al rectificador trifásico, por lo que el estudio de sus componentes es una base para realizar el diseño de las instalaciones eléctricas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada

El desarrollo del presente proyecto de carácter técnico se fundamenta en dos tipos de investigación: aplicada y exploratoria.

La investigación aplicada permitió la resolución del problema del diseño de la instalación eléctrica de bajo voltaje mediante la aplicación directa de los conocimientos técnicos adquiridos en la carrera de Tecnología en Electromecánica, y mediante el conocimiento generado por herramientas bibliográficas como son: libros, artículos científicos y tesis.

La investigación exploratoria, se fundamentó en los requerimientos que cumple el diseño del sistema de alimentación eléctrica para la bancada experimental. Por lo que se desarrolló un esquema que represente el proceso de desarrollo del proyecto como se indica en la Figura 2.1. Por lo cual, mediante la exploración del sitio dónde a futuro se implementará la instalación, se determinaron los requerimientos para las instalaciones eléctricas de acuerdo con las necesidades de alimentación y el cumplimiento de los parámetros de que debe poseer.

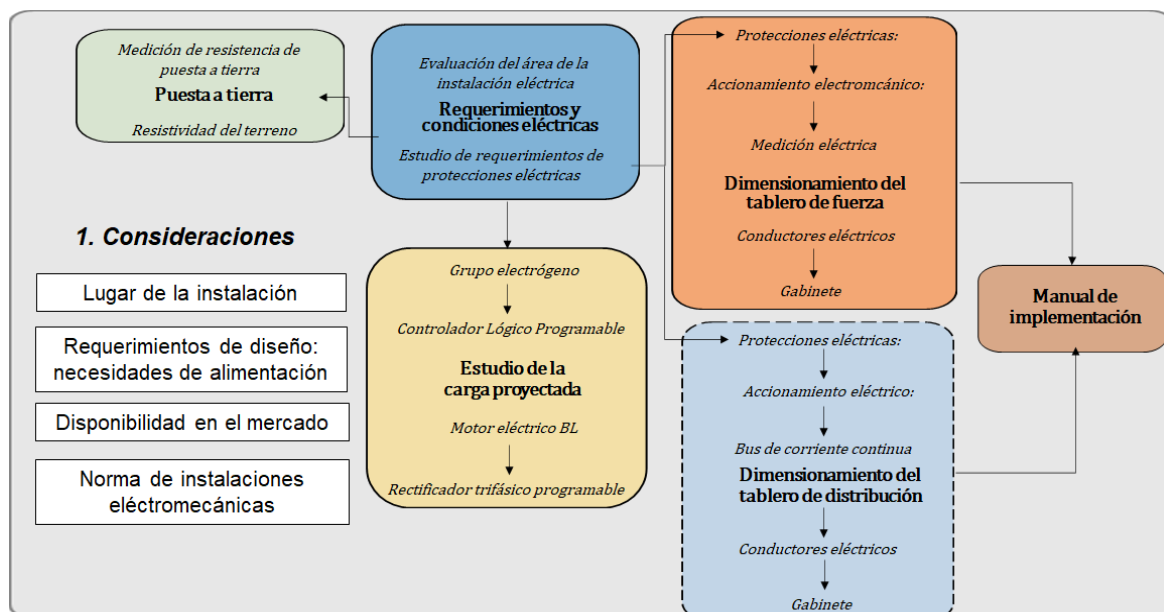


Figura 2.1 Metodología desarrollada

Es así, que en este estudio inicialmente se realizó una visita técnica al galpón de los laboratorios de la FIM, el cual es el lugar de instalación del sistema de alimentación eléctrica. Por lo que mediante una inspección visual se revisó el estado de las instalaciones eléctricas existentes con el objetivo de determinar el cumplimiento de los requerimientos mínimos para la alimentación de la bancada experimental, y verificando el número de circuitos que integran a la instalación y la distribución física del área. El estudio se lo realizó sobre el plano arquitectónico y sobre el área proyecta para la instalación.

Se determinaron los requerimientos y necesidades eléctricas de protección de acuerdo con el estudio realizado, para posteriormente realizar una estimación de la carga proyectada a través del reconocimiento de los equipos que conforman a la bancada experimental, por lo que se realizó un diagrama conceptual que integra a los elementos conformantes como son: alternador trifásico síncrono KADA rectificador AC/DC trifásico Keysight, PLC y sus módulos programables Beckhoff y un motor eléctrico sin escobillas KDE. De esta forma se determinaron los valores nominales y las especificaciones de los componentes tales como: voltaje de alimentación, corriente, potencia nominal, etc.

Mediante la estimación de la carga proyectada y el requerimiento de protecciones se procedió a realizar el cálculo de dimensionamiento de los elementos que conforman al sistema de alimentación eléctrica. Se determinaron dos circuitos que se ubican en dos tableros eléctricos. El tablero de fuerza se encarga de manejar el voltaje trifásico de corriente alterna, proveniente de la acometida eléctrica y del grupo electrógeno, por lo cual se seleccionaron los disyuntores termomagnéticos, diferencial, contactores, equipo de medición y los conductores eléctricos de acuerdo con la normativa técnica vigente.

El tablero de distribución se encarga de manejar el voltaje de corriente continua, proveniente de los rectificadores trifásicos, los cuales suministran corriente continua controlada hacia un bus eléctrico que se conecta a un controlador electrónico de velocidad y este a su vez alimenta a un motor eléctrico sin escobillas. Al igual que en el tablero de fuerza, la selección y aplicación de los equipos de protección y accionamiento se utilizó como referencia de diseño la guía de proporcionada por Schneider Electric [7] y la norma para instalaciones electromecánicas (NEC)[8], además de ciertas referencias bibliográficas que se citan más adelante.

Se realizó un estudio de puesta a tierra que cumpla con el objetivo de resistencia de puesta a tierra de 5 (Ω) que proteja a las personas y a los equipos electrónicos ante la eventual aparición de tensiones transitorias en la red eléctrica. De este modo, con un

telurómetro AEMC, se tomaron las medidas de la resistencia de la puesta a tierra utilizando el método de los 3 polos, en la cual se obtuvo el valor de la resistencia de puesta a tierra y se evaluó este parámetro.

Posteriormente, mediante el método de Wenner se determinó los valores de resistividad del terreno, con el objetivo de obtener la modelación del mismo, estableciendo una aproximación de las condiciones reales en las que se encuentra y se seleccionó un sustrato en polvo que mejore las propiedades conductivas del terreno y minimice la corrosión galvánica.

Finalmente, se realizó un documento en donde se especifican las instrucciones a seguir para la instalación del sistema, a través de diagramas que ilustran e indican el procedimiento de la instalación. Brindando lineamientos y parámetros de seguridad y una guía que permita el cumplimiento con la normativa técnica ecuatoriana vigente.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño del sistema cubre las necesidades de alimentación eléctrica, teniendo a consideración las caídas de tensión en los conductores y las disposiciones mínimas de seguridad impuestas por la normativa técnica [2], asegurando un sistema robusto y seguro en su operación sin que se interrumpa el suministro de energía.

Para el dimensionamiento de los equipos de protección, equipos de accionamiento electromecánico, equipos de medición y los conductores eléctricos que constituyen al sistema de alimentación, se valoraron los estudios de la carga proyectada y sus valores nominales como son la potencia, tensión y corriente de trabajo nominal y frecuencia.

Por lo que para el diseño del sistema de alimentación, al proyecto se lo dividió en zonas de acuerdo con la tensión eléctrica que manejan los equipos, como se muestra en la Figura 1.2.

- Zona de alimentación monofásica
- Zona de generación y alimentación eléctrica trifásica
- Zona de distribución eléctrica en corriente continua

Considerando las zonas se incorporan dos circuitos eléctricos distintos, uno para la zona de voltaje en corriente alterna trifásica, encargado de manejar la potencia proveniente del alimentador eléctrico y del grupo electrógeno, y un tablero de distribución que se encargará de manejar la potencia en corriente continua proveniente de los rectificadores trifásicos.

Los dos tableros: fuerza y distribución se ubican en el laboratorio de mecánica de fluidos, a una altura recomendable de 1,50 (m) con respecto al piso [2], de esta forma se asegura un alcance óptimo de parte del usuario que manipula los elementos. Además de facilitar cualquier tarea de mantenimiento y revisión del mismo. En la Tabla 3.1 y Figura 3.1 se describe e ilustra a través de una representación 3D a los tableros y a la bancada experimental.

Tabla 3.1 Descripción de los elementos de la bancada experimental

Nº	Descripción
1	Área del laboratorio de mecánica de fluidos
2	Banco de pruebas
3	Tablero del circuito de fuerza
4	Rack para los rectificadores
5	Tablero del circuito de distribución

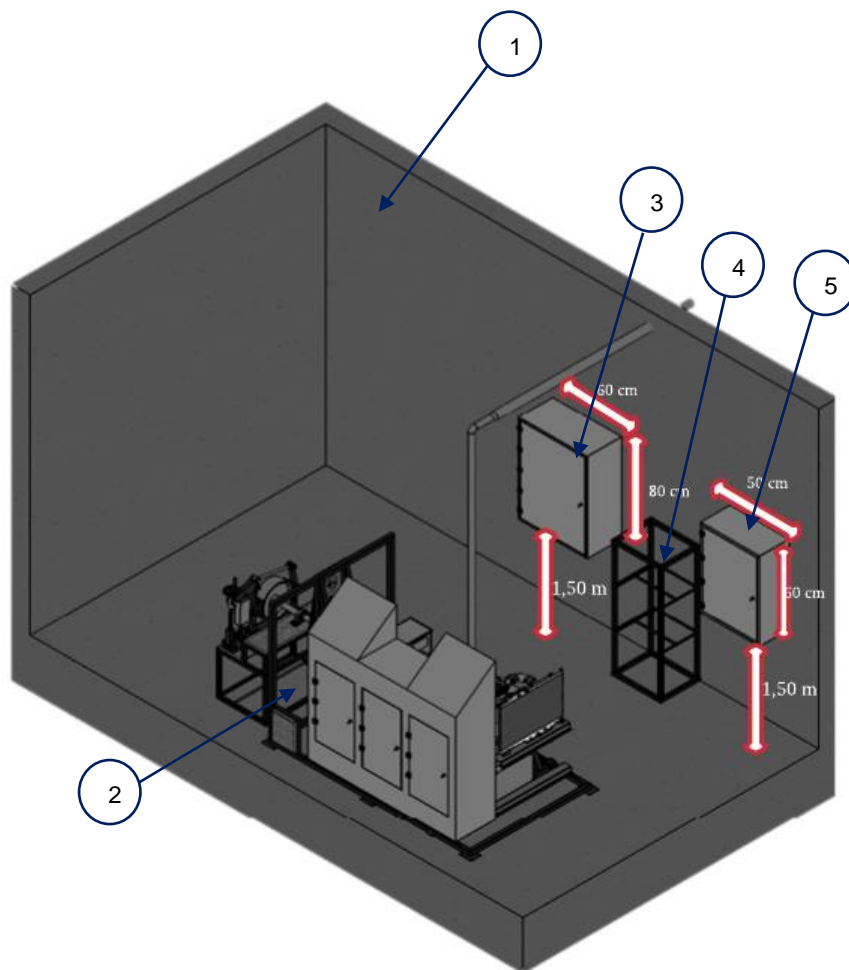


Figura 3.1 Representación 3D de la ubicación física de los tableros eléctricos y la bancada experimental.

3.1 Realizar el estudio de los requerimientos y condiciones para la bancada experimental

Evaluación del área de la instalación eléctrica

El área física del galpón de los laboratorios de la FIM se compone de las siguientes áreas: laboratorio CAD/CAM, laboratorio de INTECDIMP, laboratorio de transferencia de calor, laboratorio de biomecánica, laboratorio de termodinámica, laboratorio de mecánica de fluidos, laboratorio de esfuerzos y vibraciones, laboratorio de sistemas automotrices y laboratorio de máquinas herramientas.

En el área del laboratorio de transferencia de calor, se encuentra el tablero del centro de carga principal denominado T1-TP, como se indica en la Figura 3.2, compuesto por 3 fases a 4 hilos con una potencia aparente nominal de 110 (kVA), un voltaje nominal de 220 (V_{AC}) / 60 (Hz) y con una corriente máxima nominal de 500 (A_{AC}), protegido con un interruptor termomagnético trifásico de 325 (A_{AC}). Del centro de carga principal, se derivan 11 circuitos secundarios con su respectivo interruptor termomagnético trifásico.



Figura 3.2: Tablero principal TP-T1

Los 11 circuitos, se derivan a 11 sub-tableros secundarios que energizan a cada uno de los laboratorios, como se muestra en la Tabla 3.2, la cual indica la demanda total y la corriente nominal de la instalación eléctrica.

Tabla 3.2 Circuitos derivados del tablero principal

Sub tableros	Demanda (kVA)	Corriente nominal (A)	Protección	Ubicación
T2	13,34	35	3P-100(A)	Laboratorio CAD/CAM
T3	18,99	49,83	3P-100(A)	Laboratorio de INTECDIMP
T3A	37,50	98,41	3P-150(A)	Laboratorio de INTECDIMP
T4	8,28	21,73	3P-50(A)	Laboratorio de transferencia de calor
T5	2,74	7,19	3P-50(A)	Laboratorio de biomecánica
T6	20,51	53,82	3P-100(A)	Laboratorio de termodinámica
T7	18,68	49,03	3P-100(A)	Laboratorio de mecánica de fluidos
T8	5,31	13,93	3P-50(A)	Laboratorio de esfuerzos y vibraciones
T9	1,26	3,30	3P-50(A)	Laboratorio de sistemas automotrices
T10	25,37	66,58	3P-100(A)	Laboratorio de máquinas herramientas
T11	10	26,24	3P-50(A)	RESERVA
Demanda		80,58 (kVA)		
Corriente nominal		211,48 (A)		

Exponiendo las características nominales de demanda de 110 (kVA) y de corriente de 325 (A_{AC}) de la instalación eléctrica de los laboratorios, se determinó que la instalación existente se encuentra en la capacidad de soportar los requerimientos de la bancada experimental los cuales son: una potencia aparente de 15 (kVA) y la corriente máxima de 56 (A_{AC}). Por lo que en base al plano arquitectónico de los laboratorios de la Figura 3.3, se bosquejó con la línea en color rojo el recorrido en metros de los conductores de alimentación del tablero de fuerza desde el tablero TP-T1.

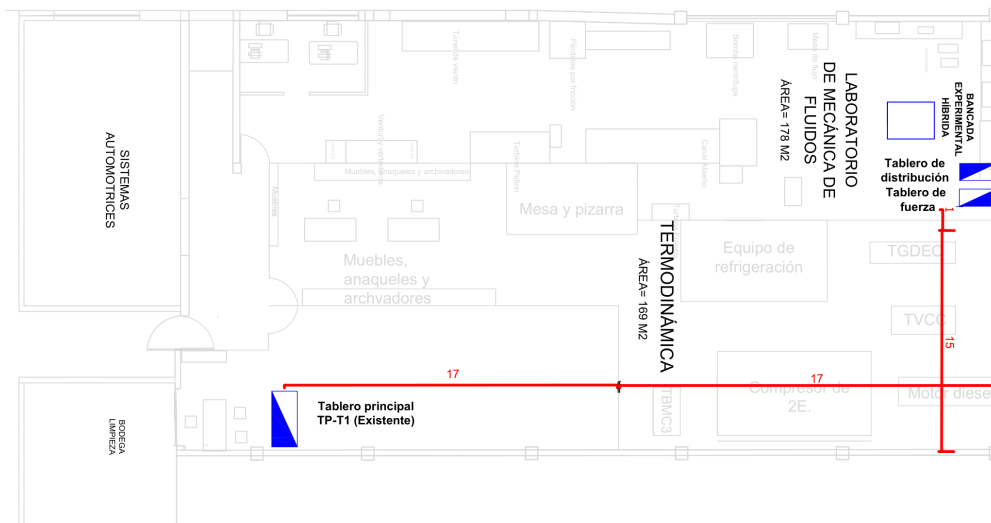


Figura 3.3 Recorrido de los conductores eléctricos desde el tablero TP-T1 hasta el tablero del circuito de fuerza

Estudio de requerimientos de protecciones eléctricas

Las protecciones en una instalación eléctrica cumplen con el objetivo de salvaguardar y proporcionar seguridad a las personas, entornos, bienes y componentes. Por lo que en cada instalación se determinan el tipo de protecciones adecuadas, de acuerdo con el análisis de las cargas y elementos que tendrá el sistema [9]. Los dispositivos encargados de la protección tienen la capacidad de operar de forma rápida y eficiente, de modo que cualquier falla que se genere logre ser despejada.

Como se analizó en la sección Evaluación del área de la instalación eléctrica, cada circuito derivado existente posee protecciones termomagnéticas, que lo protegen de sobre cargas y cortocircuitos.

La bancada experimental posee equipos electrónicos susceptibles a daños eléctricos ante eventuales fallas en el circuito de alimentación o su vez errores de maniobra, hace imprescindible tener protecciones adecuadas que le generen una robustez y confiabilidad al sistema.

Los equipos electrónicos están protegidos ante faltas en su sistema de suministro son el PLC junto con sus módulos de medición y comunicación y los rectificadores trifásicos, tanto en el ramal de la acometida como en el ramal del grupo electrógeno. Por lo que

un estudio en cada área de suministro eléctrico es necesario para determinar las protecciones eléctricas aplicables.

En esta sección se evalúan las anomalías que pueden estar presentes en la instalación y se brinda el dispositivo capaz de mitigar estas anomalías.

Variaciones de voltaje

Las variaciones de voltaje son un aumento o una reducción en los valores nominales de voltaje de forma transitoria que ocurre en la red eléctrica, que sin la debida protección reduce la vida útil y estropea a los equipos electrónicos[9].

Las variaciones de voltaje que pueden ocurrir en el lugar de la instalación son las siguientes:

- a) Cortes de energía:** Se produce por la pérdida total del suministro de energía eléctrica en la determinada área. La EEQ al ser el proveedor de energía en el sector cumple con la obligación de suministrar constantemente energía al sector, sin embargo, ya sea por temas de mantenimiento de equipos pueden existir fallas en el suministro de energía, teniendo como consecuencia una sobretensión que afectarían a los elementos conectados.
- b) Encendido y apagado de máquinas:** La bancada experimental al encontrarse en un área, en donde es constante la utilización de máquinas herramientas y equipos conformados por motores eléctricos, los mismos que provocan caídas de tensión en la red al momento de encenderlos.

Sobre corrientes por sobrecarga

Los rectificadores trifásicos que componen a la bancada experimental son equipos electrónicos delicados y de alto costo, por lo que requieren una protección que brinde seguridad y robustez al equipo ante la presencia de sobrecorrientes que pueden llegar a ocurrir en la red de alimentación, por lo que fue determinante especificar una protección que actúe ante corrientes superiores a la nominal. De producirse estos efectos perjudiciales ocasionaría un deterioro en los conductores y una posible disminución de la vida útil de los equipos[10].

Sobre corrientes por cortocircuito

En contexto, la bancada experimental posee dos fuentes de alimentación, una que es la alimentación mediante la red eléctrica y la segunda que es la alimentación mediante el grupo electrógeno. Tanto la alimentación de la red eléctrica como del alternador son considerados como fuentes alimentadoras de corriente de falla [11].

Se puede ocasionar un cortocircuito en las líneas de alimentación a la carga del alternador debido a la propia naturaleza de la máquina, pues al estar accionada por el motor de combustión interna, la máquina continuaría generando y aportando a la corriente de falla. Por lo que sin su debida protección que detecte y mitigue el efecto perjudicial de la falla, el tiempo del cortocircuito incrementaría fuertemente el calor generado por la magnitud de corriente, llegando a destruir o envejecer los aislantes del sistema de alimentación, por lo que es de vital importancia incorporar elementos que sean capaces de remover la falla lo más rápido y eficaz posible

Pérdida de fase

La falta de alguna de las fases de alimentación es una condición de riesgo en la alimentación del equipo electrónico. Si existe una falla de una fase en el suministro de energía, o un elemento de protección como un dispositivo termomagnético o un elemento de conmutación como un contactor se encuentra en desperfecto, el convertidor funcionará en condición de desequilibrio lo que puede ocasionar apagados intempestivos, y daños internos en el dispositivo. Se puede lograr mitigar este efecto, mediante la inclusión de un relé supervisor de tensiones trifásicas, que cumple con el objetivo de supervisar constantemente los valores nominales de las líneas de alimentación y verificar la correcta secuencia de fases que lleguen a la carga.

3.2 Realizar el estudio de la carga proyectada

En esta sección se detallan las características de los equipos que conforman a los sistemas de la bancada experimental, como se evidencia en la Figura 1.2. Se realizó un reconocimiento de cada uno de los equipos, con el objetivo de determinar los valores nominales y las especificaciones dadas por el fabricante, determinado sus características eléctricas como son: voltaje de alimentación, corriente, potencia nominal, factor de potencia y eficiencia. Se encuentra integrado por las cargas de generación: grupo electrógeno y cargas de consumo: PLC, motor BL y rectificador trifásico.

Grupo electrógeno


Integra al sistema de suministro energético de la bancada experimental, y se encuentra conformado por un sistema de control y de potencia.

Sistema de potencia:

Se encarga principalmente de proveer de energía eléctrica a las cargas que se encuentran en las líneas de alimentación del alternador. Se encuentra conformado por un motor de combustión interna y un alternador eléctrico trifásico[5].

- **Motor de combustión interna:** Se encarga de realizar el movimiento de rotación mecánica y transmitirlo al eje del rotor del alternador a través de un acople mecánico. El proyecto PIMI 18-01, en su primer año, hizo efectiva la adquisición de un motor de combustión marca ROTAX 582 UL, el cual se detalla en la Tabla 3.3. A partir de este motor se seleccionaron los equipos, que en conjunto conformarán al grupo electrógeno.

Tabla 3.3 Especificaciones del motor de combustión interna [12]

	ROTAX 582 UL Motor de combustión interna
	
Fabricante	Rotax
Tipo	2 tiempos
Potencia Nominal (kW)	65
Torque (Nm)	75
Velocidad (RPM)	6500

Considerando que la frecuencia de generación del alternador se encuentra estrictamente relacionada con el número de polos de la máquina y que la velocidad de

rotación del motor de combustión interna es de 6500 RPM, se incorpora en el eje del rotor del alternador una caja de reducción de velocidad a 1800 RPM.

- **Alternador eléctrico trifásico:** Es el elemento encargado de entregar la energía eléctrica trifásica mediante el movimiento de rotación realizado por el motor de combustión interna. Las especificaciones más relevantes del alternador se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Especificaciones alternador eléctrico

	KADA 15 kVA Alternador trifásico autoexcitado
	
Fabricante	KADA
Tipo	Trifásico síncrono autoexcitado
Potencia nominal (kVA)	15
Factor de potencia	0,8
Voltaje Nominal (V _{AC})	127/220
Frecuencia (Hz)	60
Polos	4
Protección	IP23


Sistema de control

Conformado por un regulador automático de voltaje (AVR) y el regulador de velocidad (Gobernador) [6].

- **Regulador automático de voltaje (AVR):** Es un dispositivo electrónico que se encarga de establecer las condiciones óptimas de generación de voltaje del grupo electrógeno, independientemente de la carga que se encuentra


conectada en sus terminales. Actúa directamente en la excitatriz del campo del alternador, aumentando o disminuyendo la inyección de corriente continua en sus terminales. En la Tabla 3.5 se detalla el AVR seleccionado.

Tabla 3.5 Especificaciones del regulador automático de voltaje [13]

AVR SX460 Regulador automático de voltaje	
	
Tecnología	Tiristor controlado por fase de media onda
Protección	Incluye función de protección de pérdida de detección y de baja velocidad
Voltaje de operación (V)	95 / 264
Frecuencia de operación (Hz)	50 / 60
Respuesta (ms)	20
Tecnología	Tiristor controlado por fase de media onda

- Regulador de velocidad (Gobernador):** Es el dispositivo encargado de establecer las condiciones óptimas de generación de frecuencia en su nivel nominal a través del control a la entrada de la velocidad de giro del motor de combustión interna y su transmisión al eje del rotor del alternador. El controlador basa su funcionamiento mediante un lazo de control PID en el que se compara la velocidad real y la deseada a través de la inyección y paso de combustible al motor [6].

Tabla 3.6 Especificaciones del regulador de velocidad [14]


	ESD-5100 Tarjeta de control de velocidad
	
Alimentación (V)	12 – 24
Rango de velocidad (Hz)	1 k – 7.5 k
Consumo de corriente (mA)	100
Rango de señal de velocidad (V)	0.5 - 50

Controlador lógico programable

El PLC en conjunto con sus módulos de comunicación y control se encargan de monitorear y mantener el control y supervisión de las variables físicas de la bancada experimental (temperatura, velocidad, nivel de combustible, etc).

Por propósito de investigación y desarrollo, el controlador es un equipo robusto, modular y entorno de desarrollo en código abierto, lo cual permite realizar rutinas más eficientes que las que se puede realizar con plataformas como LabView y Simulink. La interfaz de programación que maneja el PLC es TWINCAT 3, con programación en lenguaje estructurado en C#, y lenguajes gráficos como Ladder y FBD, que lo constituye en un equipo más abierto y versátil en el ámbito de la programación de autómatas programables. En la Tabla 3.7, se indica el PLC y de comunicación y control [15].


Tabla 3.7 Especificaciones del PLC [15]

BECKHOFF-CX5130 Controlador Lógico Programable	
	
Procesador	Intel Atom E3827 – 1.75 GHz
Memoria RAM	4 GB DDR3
Sistema Operativo	Microsoft Windows 10
ENTRADAS - SALIDAS	<ul style="list-style-type: none"> • 1 x RJ45 • 2 x USB 2.0 • Módulo de I/O digitales • Módulo de I/O analógicas • Módulo para termocuplas • Módulo para encoder Herramienta de visualización HMI
Voltaje nominal (V_{AC})	120
Frecuencia (Hz)	60
Procesador	Intel Atom E3827 – 1.75 GHz

Motor eléctrico sin escobillas

El motor eléctrico BL integra al sistema de propulsión eléctrica del banco de pruebas que conjunto con la hélice acoplada a su eje, realiza la fuerza necesaria para proveer de empuje al sistema. La parte de propulsión tiene su grado de importancia ya que sobre ella, se harán los cálculos correspondientes del proyecto La Tabla 3.8 indica las especificaciones del motor BL.

Tabla 3.8 Especificaciones del motor eléctrico sin escobillas

	KDE13218XF-105 Motor eléctrico sin escobillas
	
Voltaje (V_{DC})	60
Potencia nominal (kW)	7
Velocidad nominal (RPM)	4560
Consumo de corriente (A_{DC})	117

Rectificador trifásico programable

El rectificador cuenta con dos modos principales de operación:

- **Operación Máster-Slave:** Para aplicaciones en la cual se necesita una potencia superior a la nominal de la que puede entregar el rectificador por sí solo, es decir superior a 10 (kW). Esta operación permite al usuario establecer en un rectificador, un valor de corriente y voltaje, y al momento de que la carga requiere un mayor suministro, el segundo rectificador entra automáticamente y suministra la diferencia que se necesita. Para la hibridación de la bancada experimental, se utiliza este modo de funcionamiento ya que un rectificador se conecta directamente a la red, y el segundo se conecta al grupo electrógeno y de acuerdo con los valores de voltaje y corriente que se establezca, se conoce el porcentaje de hibridación y la capacidad en la que se encuentra operando la bancada.
- **Operación normal:** Este modo de funcionamiento permite establecer los valores de corriente y voltaje de forma individual en cada rectificador.

La bancada experimental cuenta con dos rectificadores, como se indica en la Figura 3.4, los cuales tienen el objetivo de emular el comportamiento de distintas tecnologías de baterías, mediante la regulación de voltaje y corriente que se configure en un rango característico de salida de potencia de 10 (kW) individualmente, como se indica en la Tabla 3.9.

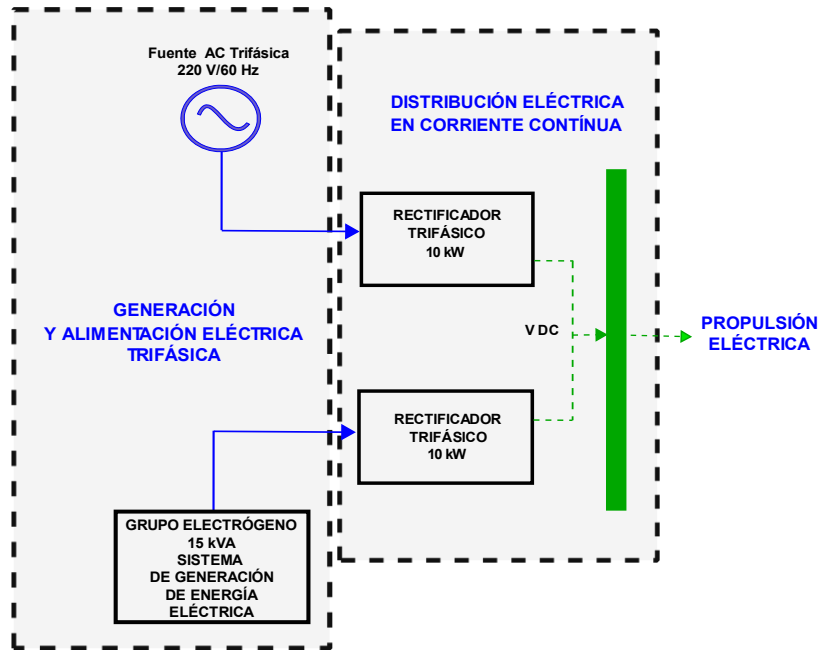


Figura 3.4 Ubicación de rectificadores en la bancada experimental

Además, este equipo se presenta internamente como una carga desequilibrada, por lo que sus valores de consumo de corriente difieren entre sus líneas de alimentación, como se indica en la Figura 3.5. Esta característica se la tomó en cuenta al momento de realizar el dimensionamiento de las protecciones eléctricas y de los conductores.

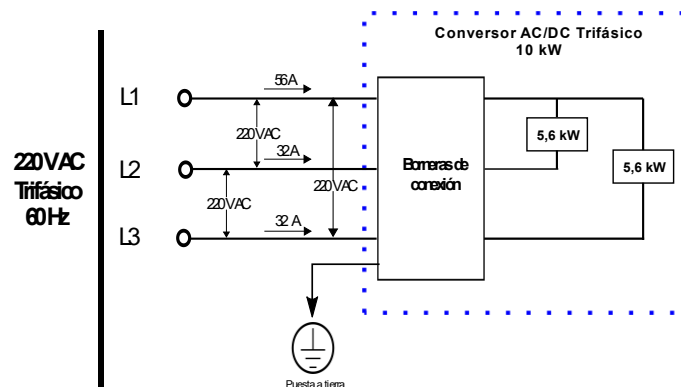



Figura 3.5. Características funcionales del rectificador trifásico programable

En la Tabla 3.9 se detalla las especificaciones más relevantes del rectificador utilizado para la hibridación de la bancada experimental.

Tabla 3.9 Especificaciones del rectificador trifásico

	KEYSIGHT N8925A AC/DC 10 kW
	
Fabricante	KEYSIGHT
Potencia (kW)	10
Voltaje nominal (V_{DC})	0 – 80
Rango de corriente (A_{DC})	0 - + 340
Voltaje nominal de alimentación (V_{AC})	208
Corriente de entrada (A_{AC})	2 x 32 y 1 x 56
Eficiencia %	89.5

3.3 Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de fuerza

Para la caracterización del tablero de fuerza se consideró las necesidades de alimentación eléctrica (potencia a instalar, tensión y corriente de trabajo nominal y frecuencia) de los equipos eléctricos y electrónicos que conforman a la bancada experimental, con el objetivo de asegurar un funcionamiento seguro, continuo y robusto en el suministro de energía. Es importante mencionar, que el tablero de fuerza trabaja en tensión en corriente alterna (CA) por parte del alimentador eléctrico y el grupo electrógeno, y alimenta a los equipos que requieren de una alimentación de 220 (V_{AC}), como es el caso de los convertidores AC/DC trifásicos KEYSIGHT, energizados a través de las ramas auxiliares correspondientes al grupo electrógeno o al alimentador eléctrico

Para el dimensionamiento de las protecciones eléctricas, se estableció la selectividad existente entre los elementos de protección, de modo que cuando exista una falla se limite su posible efecto perjudicial a solo una parte de la instalación. De forma que los demás elementos de protección y accionamiento que se encuentran aguas arriba de la falla permanecen operativos.

La selectividad por corriente depende de la intensidad que circula por los elementos de protección, en la cual el umbral de disparo de un elemento que se encuentra aguas abajo es menor que el umbral de disparo de un elemento que se encuentra aguas arriba, es decir la capacidad de disparo de corriente de los disyuntores son cada vez más grandes a medida que se avanza hacia el alimentador [16].

Por lo que los elementos de protección cumplen con los siguientes requerimientos:

- Son capaces de proporcionar una desconexión inmediata del circuito cuando ocurra una falla.
- Posee capacidades de interrupción y de sensibilidad que permiten despejar la falla.
- Sus valores nominales están correctamente especificados.

Para el dimensionamiento de los equipos de protección se incorporó un dispositivo tipo interruptor automático, que es capaz de interrumpir la corriente, cuando los valores nominales son sobrepasados. Los interruptores termomagnéticos cumplen con el objetivo de protección al incorporar la zona térmica, la cual interrumpe las sobre corrientes leves (sobrecargas) y la zona magnética la cual interrumpe las corrientes de falla (cortocircuito). Los interruptores que se seleccionan son para manejar baja tensión y su velocidad de accionamiento dependerá de su curva de operación[10].

Los elementos conformantes del circuito del tablero de fuerza abarcan desde la protección termomagnética que se ubica el tablero principal TP-T1 del laboratorio de transferencia de calor hasta la protección termomagnética de los rectificadores de la bancada experimental, como se indica en la Figura 3.6 y la Tabla 3.10.

De acuerdo con las condiciones planteadas de la sección Estudio de requerimientos de protecciones eléctricas, se dimensionó los elementos de protección, accionamiento, equipos de medición y conductores.

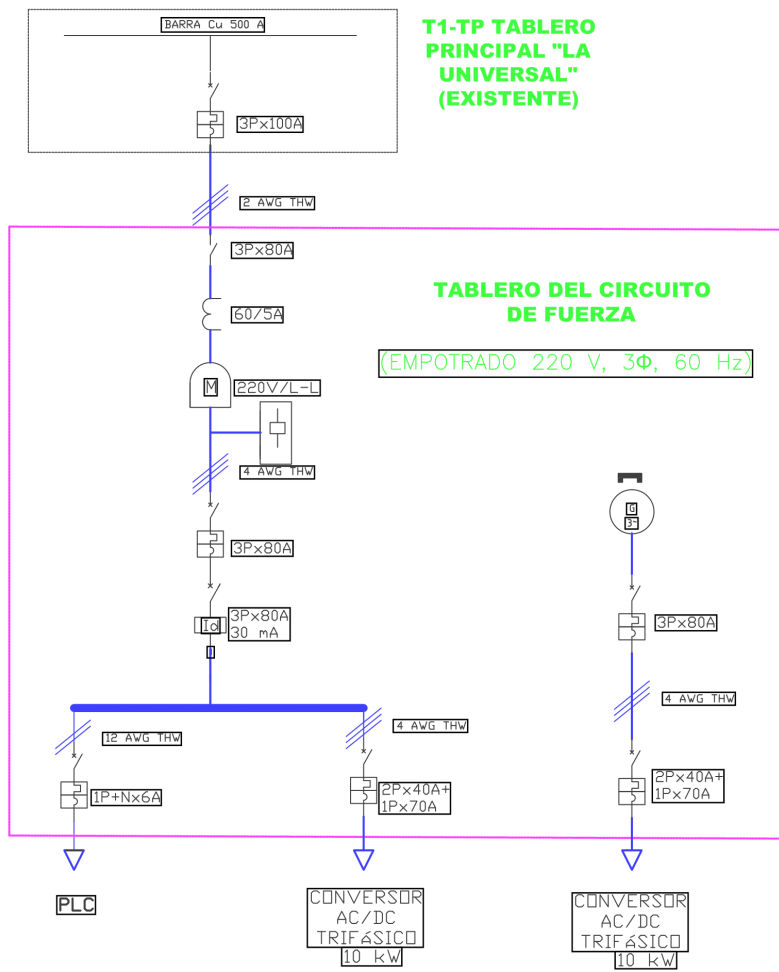


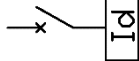

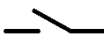

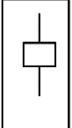


Figura 3.6 Diagrama unifilar del circuito de fuerza

Tabla 3.10 Simbología y descripción del circuito eléctrico de fuerza

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	Alternador trifásico autoexcitado 15 (kVA)
	Disyuntor termomagnético
	Disyuntor diferencial
	Transformador de corriente
	Contactor
	Medidor de tensiones trifásico
	Relé supervisor de tensiones trifásicas

Protecciones eléctricas del circuito de fuerza

Protección termomagnética del rectificador trifásico

Se consideró utilizar una protección termomagnética unipolar en la línea R y una protección bipolar en las líneas S y T debido a que el equipo posee un consumo nominal de corriente diferente en cada una de ellas, de 56 (A_{AC}) y de 32 (A_{AC}) respectivamente.

No se consideró utilizar una protección termomagnética tripolar dimensionada a la línea de mayor consumo de corriente (línea R), debido a que en el caso de existir una falla como sobrecarga en el equipo, las líneas que poseen un menor consumo nominal de corriente (línea S y T) sufrirán daños debido a que la protección estará dimensionada para la línea de mayor consumo. Es decir, la protección actuará solo cuando la corriente supere el umbral de disparo de la línea de mayor consumo.

En consecuencia y de acuerdo con la Ecuación 3.1, se calcula la corriente de dimensionamiento del elemento de protección.

$$I_2 = 1,2 * I_n$$

Ecuación 3.1 Corriente de dimensionamiento de disyuntores

Donde:

I_n : 56 (A_{AC}) y 32 (A_{AC}) corriente que circula por las líneas de alimentación

I_2 : (A_{AC}) corriente de dimensionamiento del elemento de protección.

Usando la Ecuación 3.1 se obtiene:

- Para la línea de alimentación R:

$$I_2 = 67,2 (A_{AC})$$

- Para la línea de alimentación S y T

$$I_2 = 38,4 (A_{AC})$$

Además, para asegurar que el valor de corriente de dimensionamiento de los disyuntores, no se encuentre sobre o sub dimensionada con respecto a la corriente admisible máxima por el conductor, se utiliza la condición de la Ecuación 3.2.

$$I_n \leq I_2 \leq I_z$$

Ecuación 3.2 Condición de dimensionamiento de disyuntores [17]

Donde:

I_n : 56 (A_{AC}) y 32 (A_{AC}) corriente nominal del circuito

I_2 : 67,2 (A_{AC}) corriente de dimensionamiento del elemento de protección

I_z : 85 (A) corriente admisible máxima por el conductor

Con las condiciones obtenidas se determinó el valor comercial de los disyuntores termomagnéticos como se indican en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Protecciones termomagnéticas del rectificador trifásico

	CHINT NB-40	CHINT NB-70
	Disyuntor termomagnético	Disyuntor termomagnético
Voltaje nominal (V_{AC})	220	220
Corriente de operación (A_{AC})	40	70
Número de polos	2	1
Capacidad interruptiva (kA)	10	10
Curva	Tipo C	Tipo C

Protección termomagnética principal del circuito de fuerza

En base al criterio de selectividad existente entre protecciones eléctricas, se estableció que el umbral de disparo de la protección que se encuentra aguas arriba debe ser mayor que el umbral de disparo de la protección que se encuentra aguas abajo, además se tomó como criterio de diseño, un sobredimensionamiento del 10% referente al umbral de disparo de la protección que se encuentra aguas abajo, la cual además, servirá para conectar cargas adicionales con un consumo leve de corriente.

Esta protección termomagnética se ubicó en la entrada del circuito de fuerza y actúa como protección principal para todos los elementos que lo conforman.

Teniendo a consideración este requerimiento, se seleccionó un interruptor termomagnético que se indica en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Protección termomagnética del circuito de fuerza [18]

	CHINT DZ158
	Disyuntor termomagnético
Voltaje nominal (V_{AC})	220
Corriente de operación (A_{AC})	80
Número de polos	3
Capacidad interruptiva (kA)	10
Curva	Tipo C

Protección termomagnética del conductor de derivación del tablero TP-T1

Se ubicó esta protección en el tablero principal TP-T1, que conecta a las barras del tablero con el interruptor principal del circuito de fuerza, y se encarga de proteger a todo el circuito de alimentación de la red eléctrica de la bancada experimental.

Por lo que, considerando el requerimiento anterior, se seleccionó un elemento con una capacidad superior al que se encuentra aguas abajo, como se indica en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Protección termomagnética del conductor de derivación del tablero TP-T1

	CHINT NM-100 Disyuntor termomagnético
Voltaje nominal (V_{AC})	220
Corriente de operación (A_{AC})	100
Número de polos	3
Capacidad interruptiva (kA)	50
Curva	Tipo C

Protección diferencial

Se incluyó una protección diferencial debido a que la bancada experimental se encuentra en contacto continuo con las personas, por lo que este dispositivo cumple con el objetivo de proteger a aquellos usuarios que manipulen y operen la bancada, ante la presencia de falsos contactos directos, ocasionados por corrientes de fuga.

La protección diferencial se ubicó aguas debajo de la protección termomagnética principal del circuito del tablero de fuerza, por lo que para la selección de la corriente de operación se consideró que debe ser igual o mayor al valor de la protección termomagnética. Además, para la selección de los valores de sensibilidad de las corrientes residuales, se tomó como referencia a la IEC para elementos diferenciales y se selecciona aquel con un valor de 30 (mA), el cual es usado para la protección de las personas por contacto directo [2]. Considerando este parámetro se seleccionó la protección diferencial especificada en la Tabla 3.14

Tabla 3.14 Protección diferencial [19]

	CHINT NLI-80 Disyuntor diferencial
Voltaje nominal (V_{AC})	220
Corriente de operación (A_{AC})	80
Sensibilidad (mA_{AC})	30

Protección para la pérdida de fase en el sistema

El rectificador es un equipo electrónico sensible y propenso a daños si no se cumple con los valores admisibles de alimentación, como es la alimentación eléctrica con las tres fases y un umbral de voltaje que no supere el 0,3% de la tensión nominal de alimentación. Es necesario incorporar un equipo que supervise constantemente el voltaje de la alimentación trifásica y que al detectar un sobreimpulso o anomalía en el sistema realice una desconexión automática.

El relé multifunción de protección de tensiones trifásicas además de brindar una protección ante la eventual pérdida de fase revisa el sistema ante los eventos mencionados, mediante una supervisión continua de la red trifásica, como se indica en la Tabla 3.15

Tabla 3.15 Relé multifunción de protección de tensiones trifásicas [20]

	LOVATO PVM 50 Relé multifunción de protección trifásico
Voltaje nominal (V_{AC})	220
Funciones	<ul style="list-style-type: none">• Control de secuencia de fases.• Selección de la tensión nominal• Umbral de máxima y mínima tensión ajustable• Luz verde de indicación de alimentación

Accionamiento electromecánico del circuito de fuerza

Contactador del circuito de fuerza

Se colocó un contactor en las líneas de alimentación trifásica al circuito de fuerza, el mismo que permite la energización del circuito en su totalidad. Se encuentra aguas abajo de la protección termomagnética principal del circuito, por lo que su dimensionamiento y selección depende de la máxima corriente que circula por las líneas de alimentación circuito. Por lo que se utiliza el valor de la Ecuación 3.1 correspondiente a $I_2 = 67,2$ (A), y se seleccionó la categoría de empleo de acuerdo con las condiciones de servicio a la que va a estar expuesto como lo indica la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Categoría de empleo de contactores en AC [21]

Categoría	Utilización
AC-1	Cargas resistivas o poco inductivas, cuyo factor de potencia es al menos igual a 0,95 ($\cos \varphi > 0,95$)
AC-2	Motores síncronos de frenado en contracorriente, con una intensidad de arranque 2,5 veces superior a la nominal del motor
AC-3	Motores asíncronos con una intensidad de arranque 5 a 7 veces superior a la nominal del motor
AC-4	Motores síncronos con aplicaciones de frenado a contracorriente con una intensidad de arranque de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor

Puesto que el contactor permite la energización del circuito de fuerza, es necesario seleccionar una categoría que se adapte a su modo de empleo. La categoría AC-1 cumple con este objetivo de empleo, y asegura una conexión y desconexión correcta del sistema. Es esta forma, con el parámetro de la corriente de servicio y la categoría de empleo del contactor, se seleccionó el contactor de la Tabla 3.17

Tabla 3.17 Contactor del circuito de fuerza [22]

	CHINT NC1-80 Contactador electromecánico
Categoría	AC-1
Voltaje nominal (V_{AC})	230
Corriente de operación (A_{AC})	80
Contactos principales	3 contactos NA y 0 contactos NC
Contactos auxiliares	1 contacto NA y 1 contacto NC
Número de polos	3

Elementos de mando del circuito de fuerza

Pulsadores y luces piloto

- Se seleccionó un selector de dos posiciones (ON-OFF) y una luz piloto de color verde para el encendido y apagado del circuito de fuerza.
- Una luz piloto color naranja que indica la energización del circuito.

Elementos de medida del circuito de fuerza

Transformadores de medida

Se utilizó transformadores de corriente para tomar muestras de la magnitud de corriente que circula por las líneas de conexión con los rectificadores trifásicos y llevar esta medida a un medidor digital de voltaje y corriente, por lo que se seleccionan los transformadores de corriente en un rango de 60/5 (A_{AC}).

Medidor digital de voltaje y corriente

Con el objetivo de visualizar el suministro de potencia, voltaje y corriente para actividades experimentales en la bancada, se seleccionó un medidor digital de magnitudes eléctricas como se indica en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18 Medidor digital de voltaje y amperaje [23]

	CAMSCO DM-96 5M Medidor digital de magnitudes eléctricas
Rango de voltaje (V)	50-600
Número de hilos	Trifásico – 4 hilos
Voltaje de operación (V _{AC})	110 / 220
Display	4 dígitos
Radio	5

Dimensionamiento del conductor (Tablero TP-T1- Tablero de fuerza)

Para determinar la sección mínima del calibre del conductor del tablero del circuito de fuerza, se lo realizó de acuerdo con el criterio de la corriente nominal y la caída de tensión en los conductores. La NEC recomienda que para circuitos de derivación, los conductores se encuentren dimensionados para evitar una caída de voltaje máxima del 1% [2]. En consecuencia y de acuerdo con la Ecuación 3.3

$$\Delta V = \% \cdot V_{nom}$$

Ecuación 3.3 Caída de tensión en conductores

Donde:

- % : 1% porcentaje de caída de tensión admisible
- V_{nom} : 220 (V_{AC}) voltaje nominal de la instalación
- ΔV : (V_{AC}) caída de tensión admisible en el conductor

Usando la Ecuación 3.3 se obtiene:

$$\Delta V = 2,2 (V_{AC})$$

Para determinar la sección mínima del conductor se consideró el tramo que recorre hasta su conexión con el circuito de fuerza, que es un total de 53 (m), valor que se considera en la Ecuación 3.4

$$S = \frac{\rho \cdot L}{\Delta V} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Ecuación 3.4 Sección de conductores en función de la caída de tensión

Donde:

ρ : 0,0172 ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$) constante de resistividad del conductor de cobre

L : 53 (m) Longitud del conductor

ΔV : 2,2 (V) Caída de tensión en el sistema

I : 56 (A) Intensidad de corriente

$\cos \varphi$: 0,8 factor de potencia

S : (mm^2) Sección mínima transversal del conductor

Nota: Se consideró un $f_p=0,8$ debido a que en la instalación se prevé la instalación de cargas inductivas.

Usando la Ecuación 3.4 se obtiene:

$$S = 18,56 \text{ mm}^2$$

Además, se tomó como parámetro de selección del aislante, las condiciones ambientales en las que el conductor va a encontrarse expuesto. Debido a que el área de instalación se encuentra en un área cubierta, y con una temperatura moderada, se seleccionó el aislante tipo THW de policloruro de vinilo (PVC) concéntrico”, apto para aplicaciones industriales en lugares con un ambiente seco/húmedo, que soporta una temperatura de 75 °C y una tensión de 600 (V). Al considerar lo expuesto, se utilizó la Tabla 3.19 para seleccionar el conductor que cumpla con los requisitos expuestos:

- El conductor debe soportar una corriente de 67,2 (A)
- El conductor debe poseer una sección mínima de 18,56 (mm^2).

Tabla 3.19 Calibre de conductor según el amperaje que soportan [24]

Conductor			Diámetro externo Aprox.	Capacidad de corriente (A)
Calibre (AWG)	Sección mm^2	Espesor de aislamiento		
6 AWG	13,3	1,52	7,60	65
4 AWG	21,15	1,52	8,79	85
2 AWG	33,62	1,52	10,29	115
1 AWG	42,4	2,03	12,20	130
1/0 AWG	53,5	2,03	13,21	160

Debido a que se seleccionó una protección termomagnética de 100 (A), y por el criterio de selección de disyuntores, se seleccionó el conductor calibre 2 AWG ilustrado en color amarillo en la Tabla 3.19.

Se verificó que el conductor no sobrepase los valores admisibles de caída de tensión de 1% del valor nominal, se realizó el siguiente cálculo de acuerdo con la Ecuación 3.4.

Donde:

- ρ : 0,0172 ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$) constante de resistividad del conductor de cobre
- L : 53 (m) longitud del conductor
- I : 56 (A) intensidad de corriente
- $\cos \varphi$: 0,8 factor de potencia
- S : 33,62 (mm^2) sección mínima transversal del conductor
- ΔV : (V) caída de tensión en el sistema

El resultado de la operación es:

$$\Delta V = 1,21 \text{ V}$$

Para determinar la caída de voltaje se utiliza la Ecuación 3.3 expresada en porcentaje.

Donde:

- V_{nom} : 220 (V) voltaje nominal de la instalación
- ΔV : 1,21 (V) caída de tensión admisible en el conductor
- $\Delta V\%$: % porcentaje de caída de tensión

El resultado de la operación es:

$$\% \Delta V = 0,55 \%$$

Como se evidencia, la caída de tensión es de 1,21 (V_{AC}), lo que representa un valor porcentual de 0,55% sobre el valor nominal. Por consiguiente, se cumplió el requisito de no exceder el 1% recomendado por la norma.

Dimensionamiento de conductores de los rectificadores trifásicos

Para determinar la sección mínima del conductor que se conecta desde la salida del disyuntor termomagnético principal hasta el punto de conexión del rectificador trifásico se utilizó la Ecuación 3.4

Donde:

- ρ : $0,0172 \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$ constante de resistividad del conductor de cobre
- L : 3 (m) Longitud del conductor
- ΔV : 6,6 (V) Caída de tensión en el sistema
- I : 56 (A) Intensidad de corriente
- $\cos \varphi$: 0,99 factor de potencia
- S : (mm^2) Sección mínima transversal del conductor

El resultado de la operación es:

$$S = 4,37 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Con el valor obtenido de $S = 4,37 \text{ mm}^2$ se determinó que su capacidad de corriente sea superior el valor de la Ecuación 3.1 que corresponde a $I_2 = 67,2 \text{ (A)}$.

Teniendo a consideración lo expuesto, se utilizó la Tabla 3.19 con la cual se seleccionó el calibre que cumple con estos requisitos:

- Soportar una corriente superior a 67,2 (A)
- Poseer una sección superior a 4,37 (mm^2).

Por lo que, se seleccionó un conductor calibre 4 AWG, ilustrado en color verde en la Tabla 3.19. Posteriormente, se verificó que el conductor no sobrepase los valores admisibles de caída de tensión de 3% del valor nominal, por lo que se realizó el cálculo expuesto en la Ecuación 3.4.

Donde:

- ρ : $0,0172 \left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$ constante de resistividad del conductor de cobre
- L : 3 (m) Longitud del conductor
- I : 56 (A) Intensidad de corriente

- cos φ : 0,99 factor de potencia
S : 21,15 (mm^2) Sección mínima transversal del conductor
 ΔV : (V) Caída de tensión en el sistema

El resultado de la operación es:

$$\Delta V = 0,14 (V_{AC})$$

Para determinar la caída de voltaje se utilizó la Ecuación 3.3 expresada en porcentaje

Donde:

- V_{nom} : 220 (V_{AC}) voltaje nominal de la instalación
 ΔV : 0,14 (V_{AC}) caída de tensión admisible en el conductor
 $\Delta V\%$: % porcentaje de caída de tensión

El resultado de la operación es de:

$$\% \Delta V = 0,063 \%$$

Como se evidencia, la caída de tensión es de 0,14 (V_{AC}), lo que representa un valor porcentual de 0,063% sobre el valor nominal. Por consiguiente, se cumplió el requisito de no exceder el 3% recomendado por la norma.

Una caída de tensión que supera el valor del 3% puede provocar un mal funcionamiento en los equipos electrónicos debido a la reducción de voltaje de alimentación, generado que el equipo se bloquee o se apague repentinamente, provocando una posible falla en el equipo.

Selección del gabinete para el circuito de fuerza

De acuerdo con las dimensiones de los elementos se seleccionó un gabinete doble fondo XBOX con una dimensión total de 80 x 60 x 25 (cm), representando el largo, ancho y profundidad.

Con las dimensiones del gabinete, se seleccionó el grado de protección IP en referencia a la norma CEI 60529, el cual se utiliza para clasificar a los equipos eléctricos y electrónicos de acuerdo con su grado de protección contra agua y polvo. El grado IP se

presenta con dos dígitos, el cual el primero de ellos representa la protección para sólidos y el segundo la protección contra líquidos. De esta forma se garantizó el cumplimiento de los artículos 500 al 503 de la norma NEC, los cuales especifican la protección de los elementos contra agua y polvo. La Tabla 3.20 especifica el grado de protección ante cuerpos sólidos y el agua.

Tabla 3.20 Grados IP de protección de tableros

IP	Características	IP	Características
0	Sin protección	0	Sin protección
1	Protección contra solidos de hasta 50 mm	1	Protección ante un goteo vertical
2	Protección contra solidos de hasta 12 mm	2	Protección contra goteo con inclinación de 15°
3	Protección contra solidos de hasta 2.5 mm	3	Protección ante pulverización
4	Protección contra solidos de hasta 1 mm	4	Protección ante salpicaduras
5	Protección contra polvo	5	Protección ante chorros de agua
6	Totalmente protegido contra el polvo	6	Protección ante chorros continuos de agua

Considerando, que el lugar de instalación del gabinete eléctrico se encuentra en el laboratorio de Mecánica de Fluidos, en un área cubierta y protegida del sol, de la lluvia, de la humedad y de objetos solidos inferiores a los 2,5 (mm) se determinó que un grado de protección IP 30 como se indica en la Tabla 3.20, es el adecuado para la protección de los elementos internos del gabinete. En el cual se garantizó una protección contra objetos solidos de hasta 2,5 (mm). En esta condición no se tomó en consideración la protección contra agua, debido a las razones expuestas anteriormente, por lo que no existe factor que afecte la integridad de los equipos internos del gabinete.

3.4 Realizar el dimensionamiento y caracterización del tablero de distribución

El tablero del circuito de distribución maneja el voltaje en corriente continua en la salida de los convertidores AC/DC. El cual capta la energía a través de bus en CD y alimenta un motor eléctrico sin escobillas (BL). Por lo que los elementos de protección deben ser robustos, pues a diferencia de la corriente alterna, para interrumpir la energía eléctrica resulta mucho más sencillo que en corriente continua, debido a la existencia de la

frecuencia, pues al momento de que pasa por la línea de cero se da la oportunidad de cortar el flujo de corriente, esto debido a que en corriente continua no se tiene una frecuencia, entonces se debe cortar de golpe el flujo de corriente, ocasionando arcos de voltaje en elementos que no están especialmente diseñados para este cometido, es por esta razón que en esta sección se selecciona elementos de protección, accionamiento y una barra colectora para corriente continua, como se indica en el diagrama unifilar de la Figura 3.7 y en la Tabla 3.21.

Al igual que en la sección del tablero del circuito de fuerza, se dimensionaron los elementos de protección termomagnética, ante eventuales sobre cargas o cortocircuito, considerando el criterio de selectividad existente entre los disyuntores eléctricos, de modo que cuando exista una falla se limite su posible efecto perjudicial a sola una parte de la instalación.

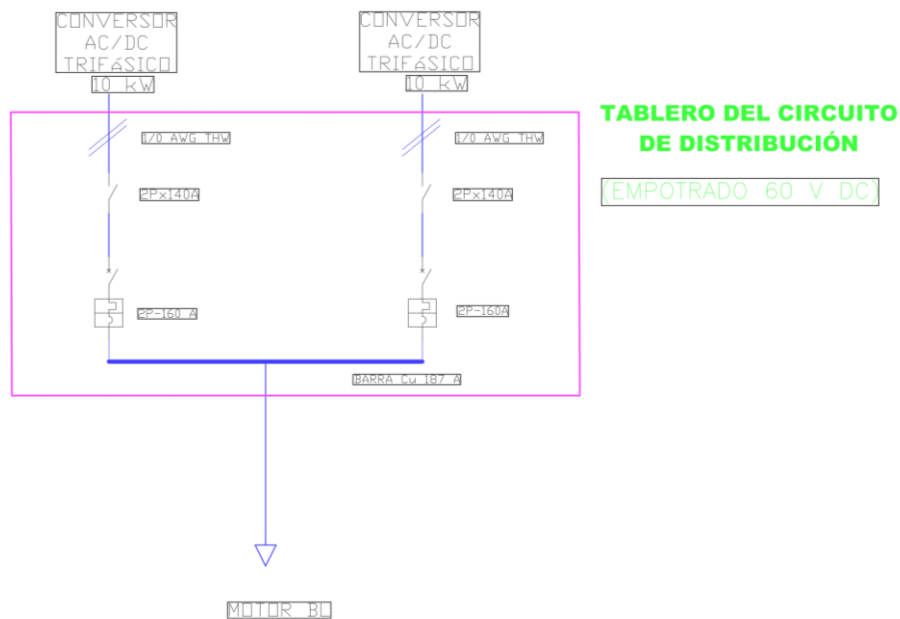


Figura 3.7 Diagrama unifilar del circuito de distribución

Tabla 3.21 Simbología y descripción del circuito de descripción

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	Disyuntor termomagnético
	Contactador

Protecciones eléctricas del circuito de distribución

Protecciones termomagnéticas del bus de corriente continua

Se seleccionaron elementos de protección termomagnética en las líneas de alimentación al bus de corriente continua, los cuales protegen a los elementos eléctricos y electrónicos que se encuentran aguas abajo del rectificador trifásico (conductores, bus de corriente continua, motor eléctrico sin escobillas).

Como se detalló en la sección Realizar el estudio de la carga proyectada, para el dimensionamiento de las protecciones se consideraron los valores de potencia nominal del motor eléctrico, con una alimentación de 60 (V_{DC}), por lo que mediante la Ecuación 3.5 se calculó la corriente de alimentación. Los valores de voltaje asignados se deben a la capacidad de operación que posee el motor eléctrico, los cuales corresponden a un rango de operación de 6 celdas a 14 celdas de voltaje, cada una de ellas con un voltaje nominal de 4,35 V_{DC}.

$$I_2 = \frac{P_M}{V_L}$$

Ecuación 3.5 Corriente de alimentación en función de la potencia nominal

Donde:

- P_M : 7 (kW) potencia nominal del motor
- V_L : 60 (V_{DC}) voltaje de alimentación
- I_2 : (A_{DC}) corriente del controlador electrónico de velocidad

Por consiguiente, se obtiene

$$I_2 = 116,67 (A_{DC})$$

Con el resultado de la corriente obtenida I_2 , y mediante la Ecuación 3.1, se calculó la corriente de dimensionamiento del elemento de protección

$$I_2 = 140 (A_{DC})$$

Y se aseguró que el valor de corriente I_2 se encuentre correctamente dimensionada, cumpliendo con la condición de la Ecuación 3.2.

$$116,67 \text{ (A)} \leq I_2 \leq 160 \text{ (A)}$$

Con la condición verificada, se determinó el valor comercial de los disyuntores termomagnéticos como se indican en la Tabla 3.22

Tabla 3.22 Protección termomagnética del bus de corriente continua

	CHINT DC-160 Disyuntor termomagnético
Voltaje nominal (V_{DC})	200
Corriente de operación (A_{DC})	160
Número de polos	2
Capacidad interruptiva (kA)	25
Curva	Tipo C

Accionamiento electromecánico del circuito de distribución

Contactores del bus de corriente continua

Se colocaron dos contactores en las líneas de alimentación al bus de corriente continua, los cuales permiten la conmutación entre los rectificadores trifásicos alimentados por el grupo electrógeno y la red de alimentación

Para el dimensionamiento de los dispositivos, se utilizó la máxima corriente que circula por las líneas de alimentación del bus de corriente de continua, por lo que se utilizó el valor de la Ecuación 3.1 correspondiente a $I_2 = 140 \text{ (A}_{DC})$, y se seleccionó la categoría de empleo de acuerdo con las condiciones de servicio a las que se encuentra expuesto, como se indica en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23 Categoría de empleo de contactores en DC.

Categoría	Utilización
DC-1	Cargas resistivas o poco inductivas, cuyo factor de potencia es al menos igual a 0,95 ($\cos \varphi > 0,95$)
DC-2	Arranque de motores shunt en el que el corte de corriente se realiza al motor alzado. En la conexión pueden establecerse intensidades de hasta 2,5 veces la intensidad nominal. Ocasionalmente puede emplearse en condiciones de cierre y apertura de 4 veces I_n o 1,1 veces U_n .
DC-3	Se destinan al arranque directo, a impulsos y al frenado en contracorriente de motores shunt. En la conexión y desconexión pueden establecerse intensidades hasta 2,5 veces la intensidad nominal. Ocasionalmente puede emplearse en condiciones de cierre y apertura de 4 veces I_n o 1,1 veces U_n .
DC-4	Se utilizan en el arranque, marcha e impulsos y al frenado contracorriente de motores serie. En la conexión y en la desconexión pueden establecerse intensidades hasta 2,5 veces I_n . Ocasionalmente puede emplearse en condiciones de cierre y apertura de 4 veces I_n o 1,1 veces U_n .

Puesto que los contactores permiten la energización de las líneas de corriente continua de los rectificadores con el bus de DC, fue necesario seleccionar una categoría que se adapte a su modo de empleo. La categoría DC-1 cumplió con este objetivo de empleo, y asegura una conexión y desconexión correcta del sistema. De esta forma, con el parámetro de la corriente de servicio y la categoría de empleo del contactor, se seleccionaron los contactores de la Tabla 3.24.

Tabla 3.24 Contactor del bus de corriente continua

	ABB AF-140 Contactor
Categoría	DC-1
Voltaje nominal (V_{DC})	200
Corriente de operación (A_{DC})	140
Contactos principales	3 contactos NA y 0 contactos NC
Contactos auxiliares	1 contacto NA y 1 contacto NC
Número de polos	2

Bus de corriente continua

Se colocaron dos barras colectoras de cobre (positivo y negativo), las cuales captan el voltaje DC suministrado por los rectificadores trifásicos. Para el dimensionamiento del bus de DC se tomó como parámetro de selección la corriente que demanda el motor BL $I_2 = 140 (A_{DC})$, y se seleccionó la sección transversal de las barras, de acuerdo con la hoja de características que presenta el fabricante “BRONMETAL” de la Tabla 3.25.

Tabla 3.25 Barras de cobre según su amperaje

Temperatura ambiente 35°C Temperatura final barras 65°C						
Ancho x Espesor	Corriente continua y alterna					
	Pintado			Desnudo		
	Número de barras			Número de barras		
	1	2	3	1	2	3
12 x 2	123	202	233	108	182	220
15 x 2	148	240	267	128	212	252
15 x 3	187	316	387	162	282	365
20 x 2	189	302	321	162	266	303
20 x 3	237	394	463	204	348	437

De acuerdo con la Tabla 3.25, se determinó que las barras que satisfacen el requerimiento aquellas que poseen las dimensiones de 15 x 3 (mm), ilustrado en color amarillo, permitiendo una corriente máxima de 187 (A).

Conductores eléctricos del circuito de distribución

Para seleccionar los conductores que se conectan al bus de corriente continua se utilizó el valor de la Ecuación 3.1 correspondiente a $I_2 = 140$ (A), con el cual se determinó el calibre en AWG del conductor. En esta ocasión no se realizó cálculo de la sección mínima del conductor debido a que la distancia de conexión es un valor mínimo y no representa un valor considerable que podría afectar al funcionamiento del equipo.

Por consiguiente, y de acuerdo con la Tabla 3.19 se selecciona un conductor unilínea calibre 1/0, con tipo de aislante THW, con una capacidad máxima de 160 (A), ilustrado en color naranja.

Selección del gabinete para el circuito de distribución

De acuerdo con las dimensiones de los elementos del circuito se seleccionó un gabinete doble fondo XBOX con una dimensión total de 60 x 50 x 25 (cm), representando el largo, ancho y profundidad. Posteriormente, se seleccionó el grado de protección IP en referencia a la norma CEI 60529, que garantiza el cumplimiento de los artículos 500 al 503 de la norma NEC, los cuales especifican la protección de los elementos contra agua y polvo. Al igual que el gabinete del circuito de fuerza, se seleccionó un grado de protección IP30, debido a las razones expuestas anteriormente.

3.5 Realizar el diseño del sistema de puesta a tierra (SPT)

En toda instalación eléctrica es fundamental que exista una puesta a tierra, con el objetivo de disipar y mitigar cualquier sobretensión que se presente en condiciones anormales al correcto funcionamiento del sistema. En este contexto, se instala una barra de tierra en el tablero de fuerza, en la cual se conectan los rectificadores trifásicos, el chasis del grupo electrógeno y la superficie metálica de los tableros eléctricos, como se indica en la Figura 3.8, garantizando una seguridad permanente tanto a las personas que operan y maniobran el sistema y a los equipos eléctricos y electrónicos, que conforman a la bancada experimental.

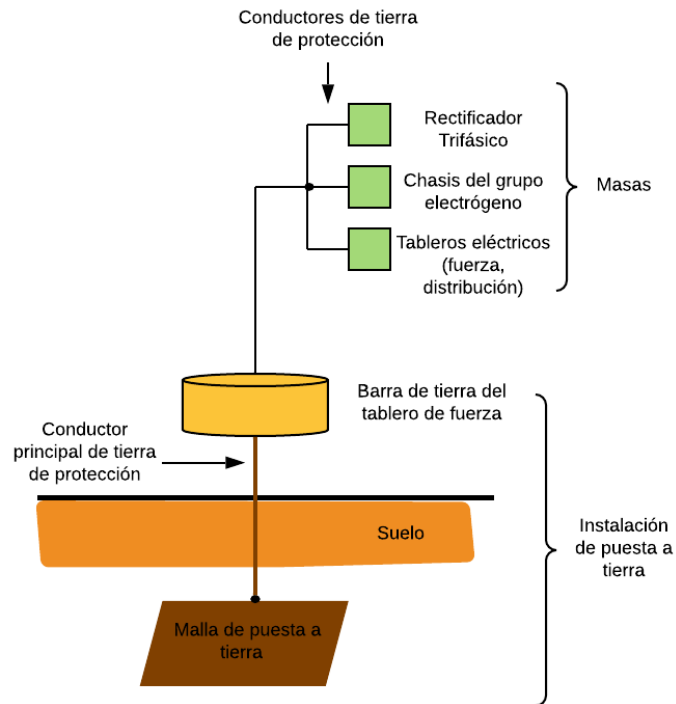


Figura 3.8 Diagrama esquemático de la puesta a tierra


Se seleccionó, un valor objetivo de resistencia de $5 \text{ } (\Omega)$, el cual se encuentra en un rango adecuado para el tipo de instalación que requiere el proyecto, como se indica en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26 Valores recomendables de resistencia de puesta a tierra

Tipo de instalación	Resistencia admisible
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas	$20 \text{ } (\Omega)$
Subestaciones de alta y extra alta tensión	$1 \text{ } (\Omega)$
Subestaciones de media tensión	$5 \text{ } (\Omega)$
Protección contra rayos	$10 \text{ } (\Omega)$
Equipos electrónicos o sensibles	$5 \text{ } (\Omega)$

Las instalaciones eléctricas de los laboratorios de la FIM cuentan con una protección de puesta a tierra, por lo que se verificó que el valor de resistencia cumpla con el requerimiento planteado de 5 (Ω). Se revisó la instalación y se verificó el estado de sus elementos. A simple vista se evidenció la inexistencia de un mantenimiento, ya que sus elementos presentaban corrosión y oxidación en su superficie. Posteriormente se realizó la respectiva medición de la resistencia de puesta a tierra con un telurómetro de la marca AEMC modelo 4620, como se indica en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27 Telurómetro AEMC modelo 4620 [25]

	MODEL 4620 Ground Resistance Tester
	
Rango (Ω)	2000
Resolución (Ω)	1
Voltaje (V)	42
Frecuencia de medición (Hz)	128 onda cuadrada
Test de corriente (mA)	0,1
Precisión (%)	5

Para medir la resistencia de la puesta a tierra, se utilizó el método de los 3 polos o también denominado método del 62%, como se indica en la Figura 3.9. El telurómetro devuelve el valor de la resistencia en función de la inyección de la corriente que se genere al utilizar dos electrodos auxiliares, separados a una distancia del 62% en función de la distancia total del segundo electrodo. [26].

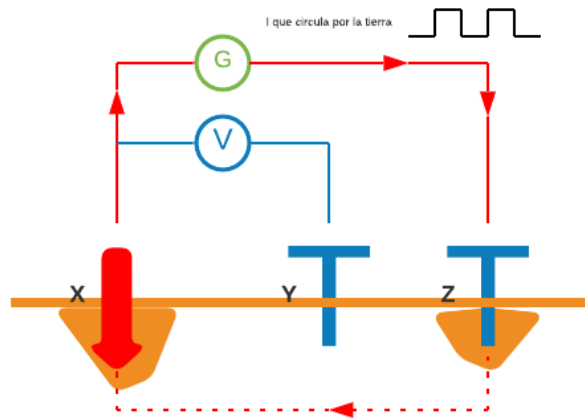


Figura 3.9 Método de los 3 polos

La distancia total medida desde la resistencia de puesta a tierra hasta el segundo electrodo fue de 10 (m), por lo que el primer electrodo se ubicó a una distancia de 6,2 (m), como se indica en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Distancia entre electrodos del 62% utilizando el método de los 3 polos

El valor de la resistencia de puesta a tierra que se obtuvo fue de 1,24 (Ω), como se indica en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Medición de resistencia de la puesta a tierra

Resistividad del terreno

Las mediciones se realizaron en el terreno que se encuentra en el exterior del galpón de los laboratorios de la FIM, con el telurómetro AEMC utilizando el método de Wenner, el cual consistió en insertar cuatro electrodos auxiliares, todos a una misma profundidad y espaciadas en intervalos de línea recta “a”. En la cual, los electrodos externos reciben una inyección de corriente I, y entre los dos electrodos internos se mide la diferencia de potencial ΔV , como se indica en la Figura 3.12.

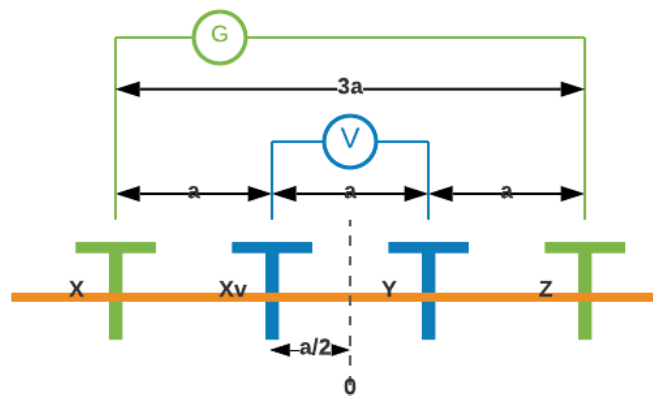


Figura 3.12 Método de Wenner

La norma técnica IEEE 80 recomienda realizar mínimo dos mediciones [27], por lo que para el desarrollo del presente proyecto, se midió en una distancia de separación “a” de 4 (m) entre electrodos, como se indica en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Medición de resistividad utilizando el método de Wenner

Se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 3.28 y se evidencia en la Figura 3.14 y Figura 3.15.

Tabla 3.28 Medición de resistencia

Separación “a” (m)	Medición de resistencia dirección 1 (Ω)	Medición de resistencia dirección 2 (Ω)
4	1,57	1,59



Figura 3.14 Medición de resistencia
dirección 1



Figura 3.15 Medición de resistencia
dirección 2

Con estos resultados se procedió a calcular la resistividad que posee el terreno mediante la Ecuación 3.6.

$$\rho_0 = 2\pi aR$$

Ecuación 3.6 Resistividad en función de la distancia

Donde:

- a : 4 (m) separación entre electrodos
- R : 1,57 (Ω) y 1,59 (Ω) resistencia medida
- ρ_0 : (Ω*m) Resistividad del terreno

Aplicando Ecuación 3.6 se obtiene:

$$\rho_o = 39,46 (\Omega)$$

$$\rho_o = 39,96 (\Omega)$$

Modelado del terreno

La modelación del terreno permitió la interpretación de los valores de resistividad obtenidos en la medición, ya que establece una aproximación de las condiciones reales en las que se encuentra el terreno. Como se observa en la Tabla 3.28, las mediciones de resistividad obtenidas no presentan una gran variación, ni dispersión entre sus valores, por lo que el modelo del terreno uniforme se presenta como una solución para realizar el modelado del terreno[28].

El modelo de terreno uniforme permite obtener un valor promedio a través de la media aritmética de los datos obtenidos de la medición de la resistividad, como se presenta en la Ecuación 3.7.

$$\rho_o = \frac{\rho_o(1) + \rho_o(2) + \rho_o(n)}{n}$$

Ecuación 3.7 Ecuación del modelo de terreno uniforme

Donde:

$\rho_o(1,2)$: 39,46 ($\Omega \cdot m$), 39,96 ($\Omega \cdot m$)

n : 2 número de mediciones realizadas

ρ_o : ($\Omega \cdot m$) resistividad promedio aplicando el método del modelo uniforme

Usando la Ecuación 3.7 se obtiene:

$$\rho_o = 39,71 (\Omega * m)$$

Como se evidenció, el resultado de la resistividad del terreno presenta un valor ideal para realizar una puesta a tierra independiente para la bancada, sin embargo, el valor obtenido de la resistencia de tierra de 1,25 (Ω) demuestra que si se es posible utilizarlo como protección, pero a la vez es necesario realizar un mantenimiento preventivo que ayude a prevenir la corrosión a la que se encuentra expuesto el sistema de tierra por lo que se recomienda utilizar un sustrato en polvo que mejore las propiedades conductivas del terreno y minimice la corrosión galvánica del terreno. El material de la Figura 3.16 es un es un tratamiento natural para suelos que contribuye a la optimización de la conductividad, mejorando la capacidad de absorción, y retención de agua en el terreno [29].



Figura 3.16 Sustrato mejorador de terreno

Entre sus principales propiedades se encuentran:

- Mejora la conductividad eléctrica del terreno.
- Minimiza los efectos de la corrosión galvánica del suelo, obteniendo un beneficio de la humedad adecuado para la puesta a tierra
- Agiliza la compactación de la puesta a tierra con el terreno, potenciando la efectividad del paso de la corriente.

3.6 Realizar un manual de implementación

El manual de implementación es una guía que aporta al proceso de montaje del sistema eléctrico, brindando lineamientos, parámetros técnicos de seguridad en cumplimiento con la normativa técnica ecuatoriana vigente.

Instalación del alimentador desde el tablero TP-T1 (Existente)

Dirigirse al laboratorio de transferencia de calor ilustrado en la Figura 3.17 , el cual es el lugar en donde se encuentra el tablero principal TP-T1 ilustrado en la Figura 3.18, el cual es el centro de carga de los laboratorios de la FIM.



Laboratorio de
Transferencia de calor

Figura 3.17 Laboratorio de transferencia de calor

Como medida de seguridad, se debe tomar a consideración que toda instalación eléctrica debe ser trabaja en frío, es decir sin el suministro de energía, por lo que se necesario suspender temporalmente la energía eléctrica de los laboratorios.

Para lo cual, dirigirse al tablero principal TP-T1 que se ilustra en la Figura 3.18, el cual contiene el disyuntor termomagnético principal que energiza a toda la instalación eléctrica de los laboratorios.

Desenergiza el tablero y proceder a realizar los trabajos de instalación.

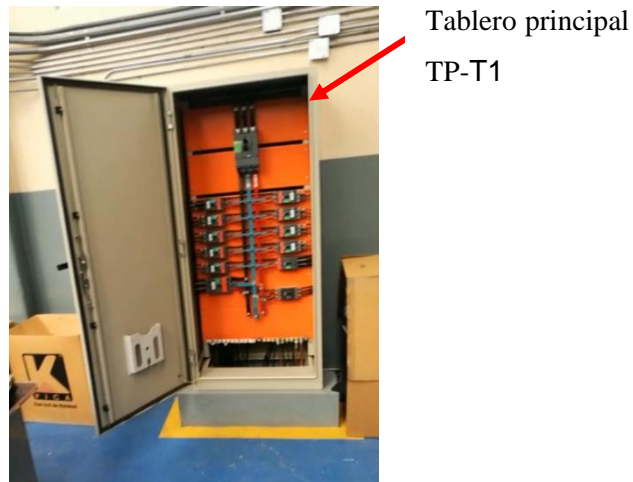


Figura 3.18 Tablero principal TP-T1

Con el circuito desenergizado, colocar el disyuntor termomagnético de 100 (A) que se indica en Figura 3.19 en las barras de voltaje del tablero principal TP-T1.

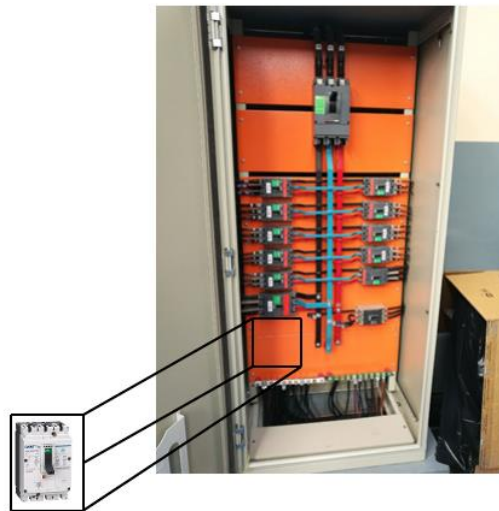


Figura 3.19 Disyuntor termomagnético de 100 A.

Realizar un recorrido ascendente vertical con el conductor THN 1/0 AWG de la salida del disyuntor de 100 (A) por la escalerilla que se indica en la Figura 3.20, y posteriormente realizar el recorrido que se indica en la Figura 3.21 hasta llegar al laboratorio de mecánica de fluidos en el cual se ubica el tablero de fuerza de la bancada experimental.

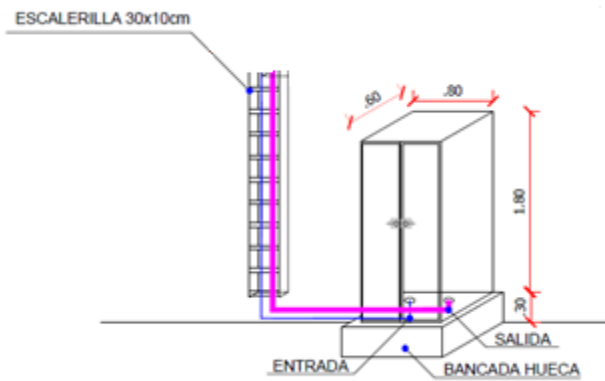


Figura 3.20 Recorrido del alimentador

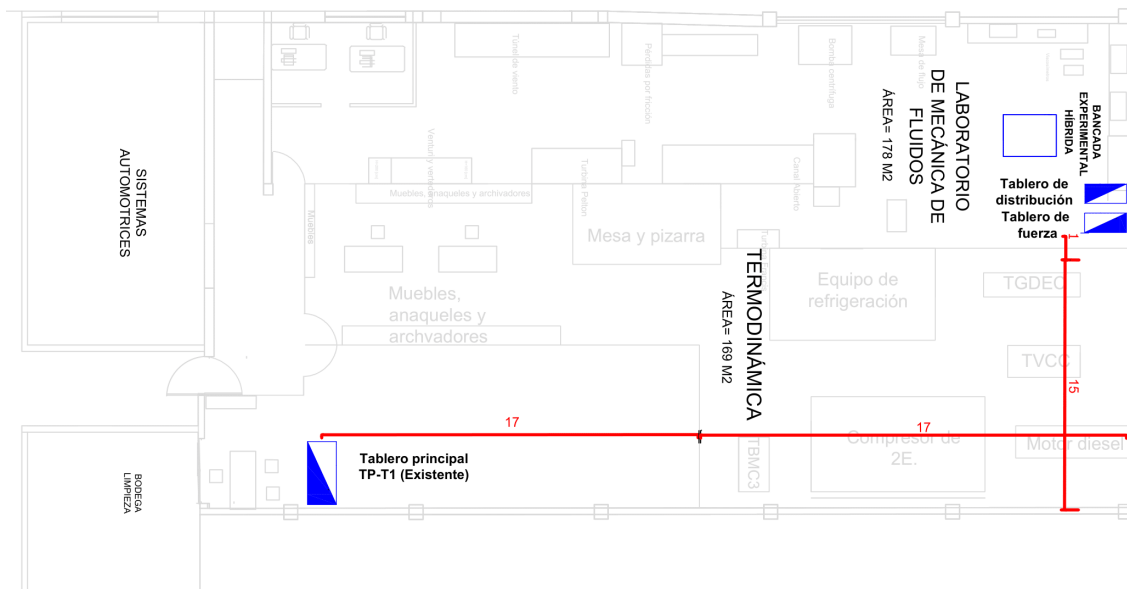


Figura 3.21 Recorrido de conductores por el área de los laboratorios de la FIM

Proceder a realizar el montaje del tablero de fuerza, adecuando los elementos de protección y maniobra que se indican a continuación en la Figura 3.22 y la Figura 3.23. En la Tabla 3.29 se indican los elementos que lo conforman.

Tabla 3.29 Elementos conformantes del tablero de fuerza

Tablero de fuerza			
Trifásico 4 hilos / 220 (V) / 60 Hz			
	Cant.	Ident.	Descripción
Parte interna	3	1	Transformadores de corriente 60/5 (A)
	2	2,3	Disyuntor termomagnético de caja moldeada de 80 (A)
	1	4	Disyuntor diferencial de 80 (A)
	1	5	Relé multifunción de protección trifásico 220 (V)
	2	6	Disyuntor termomagnético unipolar 70 (A)
	2	7	Disyuntor termomagnético bipolar 40 (A)
	1	8	Disyuntor termomagnético tripolar 80 (A)
	1	9	Contactador electromecánico 80 (A)
Parte externa	1	10	Luz piloto naranja
	1	11	Luz piloto verde
	1	12	Selector 2 posiciones
	1	13	Medidor digital de voltaje y amperaje

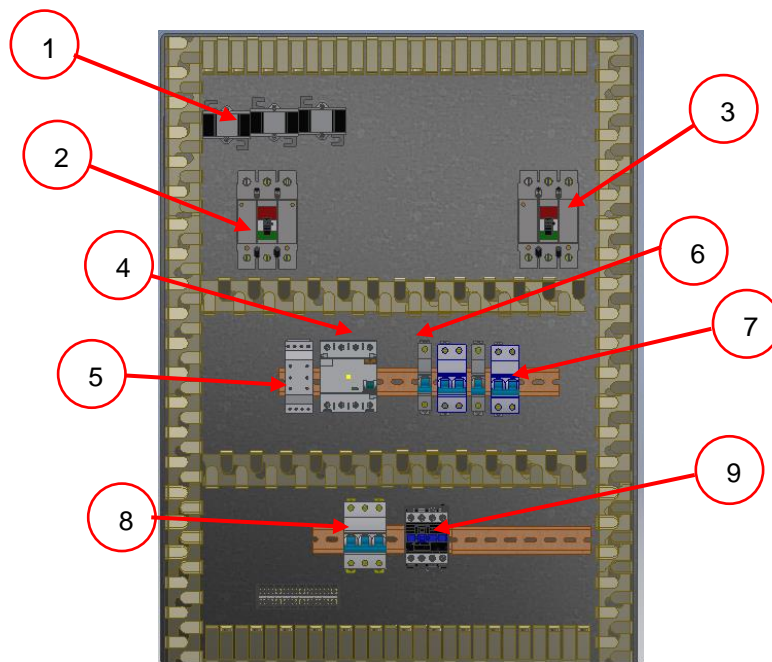


Figura 3.22 Parte interna del tablero de fuerza

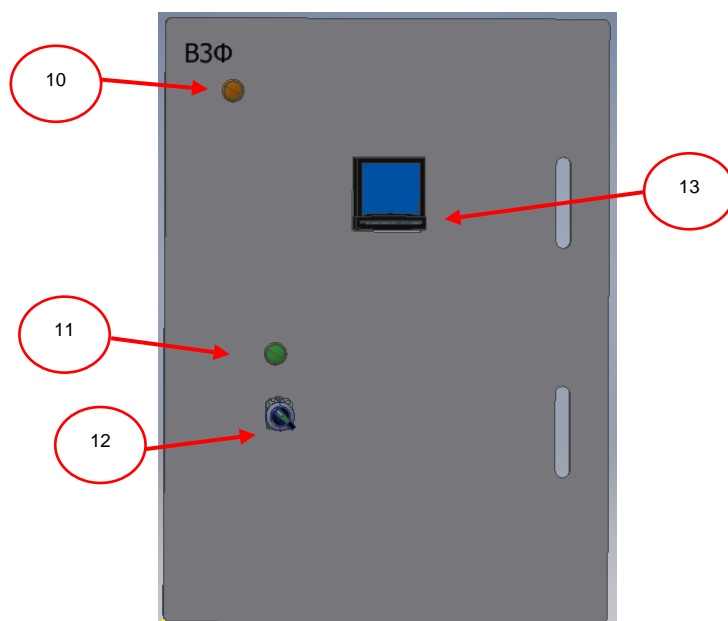


Figura 3.23 Parte externa del tablero de fuerza

Realizar el mismo procedimiento con el circuito del tablero de distribución, como se indica en la Figura 3.24 con los elementos de la Tabla 3.30.

Tabla 3.30 Elementos conformantes del tablero de distribución

Tablero de distribución			
Corriente continua 60 (V)			
	Cant.	Ident.	Descripción
Parte interna	3	1	Barras de cobre (Bus de corriente continua)
	2	2	Disyuntor termomagnético de 160 (A)
	1	3	Contactores electromecánicos de 140 (A)

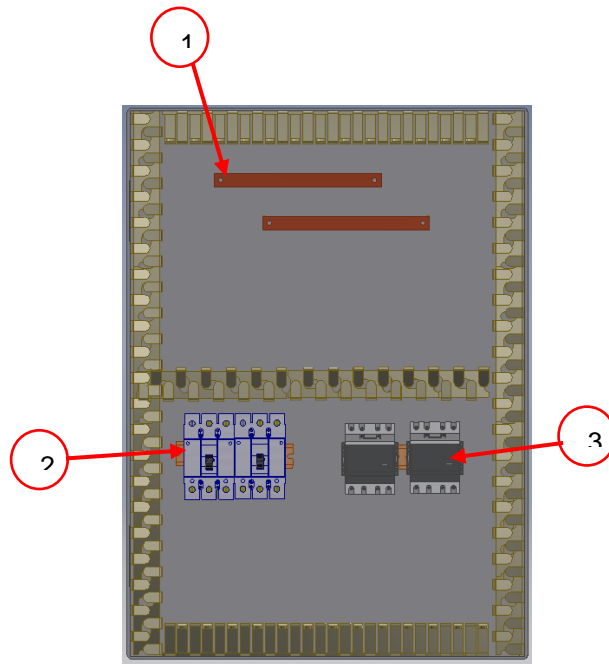


Figura 3.24 Tablero de distribución

Para realizar el cableado correspondiente revisar los esquemas y planos detallados en el ANEXO 2.

Alimentación de los rectificadores programables trifásicos

Identificar las entradas/salidas de alimentación y comunicación que posee el rectificador, ilustrados en la Figura 3.25 y en la Tabla 3.31.

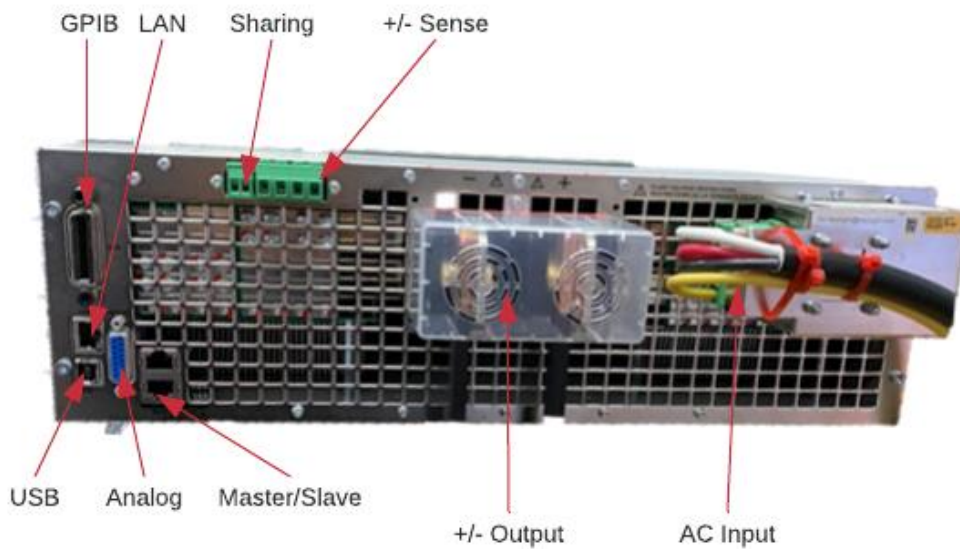


Figura 3.25 Rectificador programable trifásico

Tabla 3.31 Puertos de comunicación del rectificador trifásico

RECTIFICADOR TRIFÁSICO KEYSIGHT	
Nombre	Descripción
GPIB	Conector de interfaz GPIB
LAN	Conector de interfaz LAN
SHARING	Conector para conexiones compartidas para el funcionamiento en paralelo
+/- SENSE	Conexión de detección remota
+/- OUTPUT	Terminales de salida. Positivo y Negativo
AC INPUT	Entrada de alimentación en AC
ANALOG	Conector de señal de control externo analógico

Para alimentar el rectificador, ubicar la entrada de alimentación AC INPUT, en la parte superior derecha de la parte trasera del dispositivo, y con el conductor calibre 4 AWG con una terminación tipo puntera, introducir las fases en las borneras como se ilustra en Figura 3.26.

Apretar de manera fuerte y segura con un destornillador para evitar que se generen falsos contactos entre las superficies de conexión.

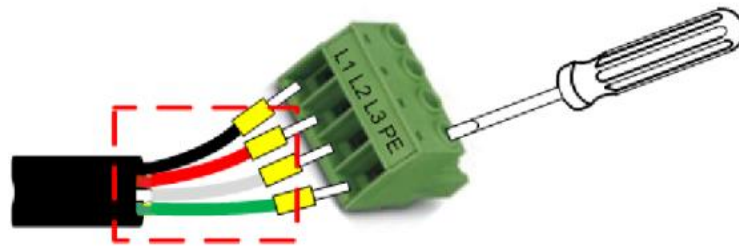


Figura 3.26 Alimentación del rectificador trifásico

Se recomienda utilizar colores de cables estandarizados, para generar una mejor identificación entre las fases de alimentación como son: color negro, rojo y blanco y el conductor de tierra utilizar un color verde.

Conexión del rectificador con el bus de corriente continua

Identificar la salida +/- OUTPUT, en la parte media del rectificador trifásico. Para esta conexión se recomienda utilizar terminales tipo horquilla con el conductor 1/0 AWG, además añadir arandelas y pernos diámetro M8 que permitan realizar una conexión robusta y segura entre los terminales, como se ilustra en la Figura 3.27

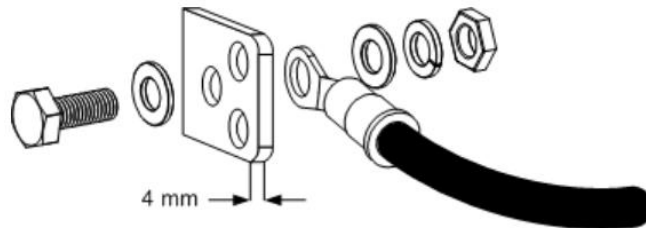


Figura 3.27 Conexión de la salida de voltaje CC. [15]

Llevar los conductores hacia el bus de corriente continua que se encuentran en el tablero de distribución, y de igual manera con terminales tipo horquilla, realizar la conexión con las barras de cobre, como se indica en la Figura 3.28.

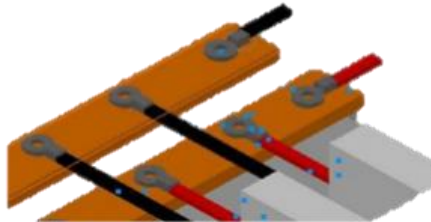


Figura 3.28 Conexión bus de DC

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las especificaciones técnicas de los equipos eléctricos y electrónicos son importantes en el diseño de instalaciones, ya que determinan los requerimientos de alimentación del sistema así como los elementos necesarios para proporcionar la seguridad a los equipos y a los usuarios.
- Las protecciones eléctricas se seleccionan en función del estudio que se realiza para determinar las posibles fallas y anomalías que pueden ocurrir en una instalación, pues la correcta selección de ellas asegura confiabilidad y robustez en el sistema, al brindar protección a los equipos y a las personas que se encargan de operar y maniobrar el sistema.
- El calibre de los conductores se lo selecciona con el objetivo de que su corriente máxima de operación no exceda el valor admisible permitido, con el objetivo de evitar un envejecimiento, deterioro prematuro y disminuir las pérdidas de voltaje en el cobre.
- Las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta la puesta tierra, puede reducir el valor de su resistencia, por lo que se debe verificar su estado mediante revisiones periódicas, que permitan cerciorarse de que la resistencia de puesta a tierra sigue cumpliendo con el requerimiento, caso contrario se le otorga un mantenimiento correctivo mediante la adición de sustratos o aditivos que mejoren la consistencia química del terreno, favorezca la conductividad eléctrica y minimice la corrosión galvánica.
- El manual de implementación permite otorgar una guía de trabajo, facilitando el montaje del sistema, al recopilar información útil y relevante y complementándose con esquemas y figuras que constituyen una herramienta de gran utilidad para el ubicación y montaje de los equipos a instalarse.

4.2 Recomendaciones

- Recopilar información bibliográfica relevante y de fuentes confiables que aporten al entendimiento y comprensión de los sistemas involucrados en la propulsión híbrida. De esta forma se obtiene información útil que aporta a determinar requerimientos eléctricos de alimentación y de protección.
- Se debe seleccionar los gabinetes eléctricos en función de las dimensiones físicas de los elementos que los conforman, esto con el fin de evitar insuficiencia de espacio en el interior de los gabinetes. Además que se asegura una ventilación adecuada
- Considerar la adición de un espacio extra para adicionar elementos (protección, accionamiento) en caso de una posible ampliación o mejora del sistema de protección.
- Se recomienda realizar un diseño de control electrónico de carga, que permita un monitoreo constante de la potencia que demanda el sistema, de modo que cuando el valor de potencia vaya disminuyendo hasta alcanzar el 30% de su valor nominal, se aumente progresivamente pasos de carga.
- Las mediciones de la resistividad no deben realizarse cuando el terreno ha sido influenciado por la presencia de lluvias, ya que la humedad es un factor influyente en el valor de la resistividad.
- Para medir la resistividad mediante el método de Wenner, es recomendable utilizar un intervalo de espaciamiento entre electrodos de 4 (m). Con el objetivo de asegurar que las mediciones sean confiables y precisas, pues este valor es incluso recomendado por la IEEE 80. De esta manera se descarta impresiones y variaciones en la medición.
- Realizar como mínimo una medición de resistividad en dos direcciones diferentes, como lo indica norma IEEE 80. Con el objetivo de determinar que los valores obtenidos se aproximen a las condiciones reales del terreno y que permitan una correcta interpretación a través de los métodos de modelación de terreno. De esta manera se determina un método de modelación en función de las medidas obtenidas en campo.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. A. Valencia, "Diseño y ensamblaje de un vehículo aéreo no tripulado de alas fijas que utilice propulsión eléctrica para el monitoreo de protección hídrica.," Quito, 2018.
- [2] Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, *Norma ecuatoriana de la construcción. Instalaciones eléctricas*. Quito:, 2018.
- [3] K. V. Singh, H. O. Bansal, and D. Singh, "A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components," *J. Mod. Transp.*, 2019, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-019-0184-3>.
- [4] Y. Xie, SAVVARISAL, T. ANTONIOS, D. Zhang, and J. Gu, "Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies," *Chinese J. Aeronaut.*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120303368>.
- [5] L. S. Yépez and R. E. Zapata, "Diseño, Construcción, Instalación y Puesta en marcha del tablero de control y distribución energética, para dos Grupos Electrógénos a gas Waukesha de 1500 KVA, 480 VAC, fp=0.8, en el campo MDC de ENAP-SIPETROL," Universidad San Francisco de Quito.
- [6] C. D. Mancero, "Desarrollo de un módulo de software en lenguaje de programación Python para el estudio de Flujo de Potencia Inercial," Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [7] Schneider Electric, "Guía de diseño de instalaciones eléctricas," 2010. https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Application+solutions&p_File_Name=020511_E10-guia-diseno-instalac-electricas.pdf&p_Doc_Ref=020511E10.
- [8] Norma Ecuatoriana de la Construcción, *Instalaciones electromcánicas*. 2013.
- [9] P. S. Villacres and N. M. Pozo, "Diseño e implementación del sistema de protecciones eléctricas y de seguridad en el laboratorio de pruebas de equipos a 15kV. Latacunga," Universidad del Cotopaxi, 2011.
- [10] G. Enriquez, *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*, 2nd ed. Mexico D.F, 2007.
- [11] IEEE-Rama Estudiantil-fing, "Teoría de cortocircuitos," 2019.

- https://iie.fing.edu.uy/ense/asign/iiee/Documentos/Teorico/Calculo_de_las_corrientes_de_cortocircuito.pdf.
- [12] Flyrotax, “Rotax 582 UL - Rotax Aircraft Engines,” 2020. <https://www.flyrotax.com/produkte/detail/rotax-582-ul.html>. [Accessed: 12- Sep-2020].
- [13] General Power Limited, “SX460 – Stamford.” https://www.genpowerusa.com/automatic-voltage-regulators/Stamford-sx460-voltage-regulator-avr?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=DSA-VoltageRegulators-NorthSouthAmerica&utm_term=&gclid=Cj0KCQiAzzs-RCCARIsANotFgM9oDCLq2PCWN2OF_L19MitvDFCQBgHgNR.
- [14] Cramelectro, “Speed Control Unit,” 2020. <http://www.cramelectro.com/docs/ENG/Speed Control Unit ESD5100 Series.pdf>.
- [15] Beckhoff, “BECKHOFF New Automation Technology,” 2020. https://www.beckhoff.com/english.asp?embedded_pc/cx5020.htm.
- [16] A. Eduard, “Fundamentos de selectividad entre interruptores o disyuntores,” 2020. <https://www.electricaplicada.com/fundamentos-de-selectividad-entre-interruptores-o-disyuntores/#:~:text=Selectividad de corriente%3A,la unidad conectada aguas arriba>.
- [17] Montaje Electromecánico, “Asignación de protección para cables y conductores,” 2020. <https://sites.google.com/site/399montaje electromecanico/asignacion-de-proteccion-para-cables-y-conductores>.
- [18] Chint, “Interruptores automáticos termomagnéticos.” <https://www.chint.eu/products/aparamenta-modular/interruptores-automaticos-magnetotermicos/serie-dz158>.
- [19] Chint, “Interruptores Diferenciales.” <https://www.chint.eu/products/aparamenta-modular/interruptores-diferenciales/serie-nl1-tipo-ac>.
- [20] L. Electric, “Relés de protección.” https://www.lovatoelectric.com/download/pd50e02_05.pdf.
- [21] Schneider Electric, “Categorías de empleo de contactores.” https://www.se.com/ww/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/33000/FA33498/es_ES/Categorias de empleo.pdf.

- [22] Chint, "Contactores Industriales." <https://www.chint.eu/products/soluciones-para-la-industria/contactores-industriales/serie-nc1>.
- [23] Camsco Electric, "Digital Panel Meter." <https://www.camsco.com.tw/spa/digital-multimeter/digital-panel-meter.html#group-4>.
- [24] Electrocables, "Catálogo de productos," 2018. <https://www.electrocable.com/uploads/catficha/cata-logo-electrocables-2018.pdf>.
- [25] AEMC Instrument, "Ground Resistance Tester." <https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/datasheets/Ground-Tester/2130-43.pdf>.
- [26] Chauvin Arnoux, "Guía de medición de tierra." https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_tierra_ed2.pdf.
- [27] R. J. Samuel and C. E. Antonio, *Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. 2010.
- [28] D. P. Eusebio, "Elaboración de un programa para computador de dimensionamiento y cálculo de mallas de puesta a tierra basado en la norma IEEE 80-2000," Universidad Nacional del centro del Perú, 2013.
- [29] Fm Electrodo, "Gem Mejorador de Suelo - FM Compactador Plus," 2019. <http://www.fmelectrodo.com/producto/gel-mejorador-suelo-puesta-a-tierra-ecuador/#:~:text=Descripción,así la concentración de electrolitos>.

ANEXOS

ANEXO 1: CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

ANEXO 2: PLANOS Y ESQUEMAS