



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO EXPERIMENTAL
CON UN SISTEMA DE CONTROL HIDRÁULICO DE DOS
BOMBAS A PRESIÓN CONSTANTE**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: DIEGO ALEXANDER RUMIPULLA COCHAY
ISMAEL JOSE ULLAURI ESPINOZA

TUTOR: ING. CARLOS ULICER PERALTA LÓPEZ

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Ismael José Ullauri Espinoza con documento de identificación N° 0150396430 y Diego Alexander Rumipulla Cochay con documento de identificación N° 0106484462; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 25 de marzo del 2024

Atentamente,



Ismael José Ullauri Espinoza

0150396430



Diego Alexander Rumipulla Cochay

0106484462

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Nosotros, Ismael José Ullauri Espinoza con documento de identificación N° 0150396430 y Diego Alexander Rumipulla Cochay con documento de identificación N° 0106484462, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Diseño y construcción de un banco experimental con un sistema de control hidráulico de dos bombas a presión constante”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 25 de marzo del 2024

Atentamente,



Ismael José Ullauri Espinoza

0150396430



Diego Alexander Rumipulla Cochay

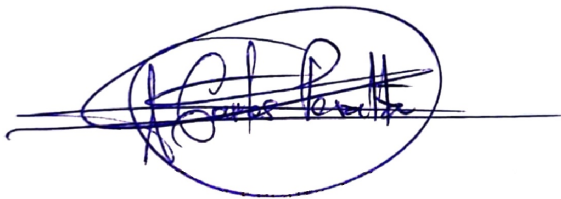
0106484462

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Ulicer Peralta López con documento de identificación N° 0103112561, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO EXPERIMENTAL CON UN SISTEMA DE CONTROL HIDRÁULICO DE DOS BOMBAS A PRESIÓN CONSTANTE, realizado por Ismael José Ullauri Espinoza con documento de identificación N° 0150396430 y Diego Alexander Rumipulla Cochay con documento de identificación N° 0106484462, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de marzo del 2024

Atentamente,



Ing. Carlos Ulicer Peralta López, Mgst.

0103112561

DEDICATORIA

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, hermanos y tía, quienes han sido mi fuente inagotable de apoyo y motivación a lo largo de esta ardua travesía académica. A mi madre y tía, Mercedes Espinoza y Blanca Espinoza, quienes fueron mi eterna inspiración y pilares fundamentales en mi vida, quiero dedicarles un agradecimiento especial. Su amor incondicional, paciencia y sabiduría han sido mi guía constante. Gracias por ser mi ejemplo de perseverancia y dedicación. Cada logro alcanzado en este proyecto lleva impreso su legado de esfuerzo y sacrificio. Mis hermanos, Holger, Stalyn y Miguel, les agradezco por su constante aliento y comprensión. Su apoyo inquebrantable ha sido el motor que impulsa mis logros. Y por último, a mis amigos de la universidad quienes compartieron conmigo no solo un aula sino también risas y desafíos.

Ismael José Ullauri Espinoza

Expreso mi profundo agradecimiento y gratitud a Dios, quien ha sido mi fuente de fortaleza en este arduo camino académico. Estoy especialmente agradecido con mis padres, Juan y Magali, cuyo amor, apoyo constante y sacrificios, han sido la base sobre la cual he construido mis logros. A mi hermano Nicolás, mi pequeño rayo de sol, tu inocencia, alegría, amor incondicional y risas han sido el mejor antídoto contra el estrés y tu presencia mi regalo más grande. Finalmente doy las gracias a mis amistades y seres queridos por compartir conmigo desafíos y momentos imborrables, su compañía hizo que este viaje sea inolvidable.

Diego Alexander Rumipulla Cochay

RESUMEN

El propósito principal del proyecto de titulación se basó en estudiar y analizar el ahorro energético y comportamiento de un sistema de dos bombas de agua al funcionar a presión constante, usando dispositivos tecnológicos modernos tal como un controlador lógico programable y dos variadores de frecuencia. Dichos equipos son los responsables de controlar el funcionamiento de las bombas como también de todos los elementos instalados en el banco experimental.

El punto de partida para alcanzar los objetivos planteados fue el diseño 3D del sistema de control hidráulico de dos bombas a presión constante, para lo cual se utilizó el software Fusion 360 desarrollado por la empresa Autodesk. Para el diseño se tomó en cuenta la ubicación de cada equipo eléctrico y electrónico para posteriormente ser instalados. Además, el diseño también estuvo conformado por el dimensionamiento de los conductores eléctricos, dispositivos de protección, como también de la parte hidráulica del sistema, constituida por tuberías de PVC, un manómetro, encargado de medir la presión del sistema y también un transductor de presión, el cual funciona como retroalimentación del sistema planteado.

Teniendo el diseño establecido se dio paso a la implementación, para lo cual se tomó en cuenta lo previamente proyectado. Para poder comprobar el correcto funcionamiento del banco experimental se realizó la respectiva programación y configuración del PLC S7-1500 y los VFD's de la marca ABB. Para programar el PLC se utilizó el software TIA PORTAL, en donde se crearon las respectivas líneas de programación, es decir el conjuntos de ordenes que deben seguir las bombas de agua y demás elementos.

La propuesta planteada es de gran utilidad para entender y comprender las ventajas encaminadas al ahorro de energía eléctrica que se obtienen al hacer uso de dispositivos de automatización en sistemas comúnmente usados en áreas industriales. También, el banco experimental sirve de gran utilidad para el aprendizaje de los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, por el motivo que queda como recurso académico dentro los laboratorios correspondientes a la carrera de electricidad.

ABSTRACT

The main purpose of the degree project was to study and analyze the energy savings and behavior of a system of two water pumps when operating at constant pressure, using modern technological devices such as a programmable logic controller and two frequency inverters. These teams are responsible for controlling the operation of the pumps as well as all the elements installed on the experimental bench.

The starting point to achieve the objectives set was the 3D design of the hydraulic control system of two pumps at constant pressure, for which the Fusion 360 software developed by the company Autodesk was used. For the design, the location of each electrical and electronic equipment was taken into account to be later installed. In addition, the design was also made up of the sizing of the electrical conductors, protection devices, as well as the hydraulic part of the system, made up of PVC pipes, a pressure gauge, in charge of measuring the pressure of the system and also a pressure transducer, which works as feedback of the proposed system.

Once the design was established, the implementation began, taking into account what had been previously planned. In order to verify the correct operation of the experimental bench, the respective programming and configuration of the PLC S7-1500 and the VFD's ABB was carried out. To program the PLC, the TIA PORTAL software was used, where the respective programming lines were created, i.e. the sets of orders to be followed by the water pumps and other elements.

The proposal put forward is very useful for understanding and understanding the advantages of saving electrical energy that are obtained by using automation devices in systems commonly used in industrial areas. Also, the experimental bench is very useful for the learning of the students of the Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, for the reason that it remains as an academic resource within the laboratories corresponding to the career of electricity.

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	I
CERTIFICACIÓN	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	3
1 MARCO TEÓRICO	5
1.1 Variador de Frecuencia	5
1.1.1 Definición	5
1.1.2 Principio de funcionamiento	6
1.1.3 Ventajas	8
1.1.4 Aplicaciones	9
1.1.5 Macros de Aplicación	10
1.2 Transductor de presión	10
1.2.1 Tipos de mediciones de presión	11
1.3 Controlador lógico programable	12
1.3.1 Definición	12
1.3.2 Componentes	13
1.3.3 Lenguaje de programación	14
1.3.4 Ventajas del uso de un controlador lógico programable	14
1.4 Sistemas de bombeo de agua	15
1.4.1 Estadísticas de consumo	15

1.4.2	Clasificación de las bombas	17
1.4.3	Métodos de control de presión y flujo de agua	18
1.4.3.1	Regulación de paso	19
1.4.3.2	Recirculación o Desvío	19
1.4.3.3	Control cíclico o Control On-Off	20
1.4.3.4	Control con VFD	20
1.4.4	Problemática de los métodos convencionales de control de presión y flujo de agua	22
1.4.5	Sistema de presión constante	23
1.4.5.1	Ventajas	24
2	MARCO METODOLÓGICO	25
2.1	Fase de diseño	25
2.1.1	Diseño de sistema en 3D	25
2.1.2	Dimensionamiento y selección de equipo	28
2.1.3	Costo de componentes	32
2.2	Programación y configuración de equipos	33
2.2.1	Programación del PLC	33
2.2.2	Configuración del VDF	37
2.3	Fase de implementación	42
2.3.1	Requerimientos del sistema de presión constante	42
2.3.2	Construcción del banco experimental	42
2.3.2.1	Cableado del sistema de control	46
2.3.2.2	Cableado del sistema de fuerza	47
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.1	Análisis de Consumo Energético	49
3.2	Análisis de funcionamiento del banco experimental	52
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1	Conclusiones	57
4.2	Recomendaciones	58
	ANEXOS	60
	A Plano de acrílicos	61
	B Mediciones con el Fluke 1735	64
	BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Variador de Frecuencia ABB ACS355-03E-02A4-2 [1].	6
1.2	Diagrama de principio de funcionamiento del variador de frecuencia [1].	6
1.3	Conversión entrante de CA en CC [1].	7
1.4	Suavizada onda DC con filtros [1].	7
1.5	Conversión CC en CA [1].	8
1.6	Transductor de presión de 0-1MPa.	11
1.7	PLC S7-1500/ET 200MP [2].	13
1.8	Consumo de electricidad por sector (GWh) [3].	15
1.9	Estructura del consumo de electricidad (%) [3].	16
1.10	Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en el sector de la agroindustria [4].	16
1.11	Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en edificios públicos [5].	17
1.12	Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en el sector comercial [6].	17
1.13	Clasificación de bombas [7].	18
1.14	Método de control mediante regulación de paso [8].	19
1.15	Método de control mediante recirculación [8].	19
1.16	Método de control cíclico [8]	20
1.17	Método de control mediante variador de frecuencia [8].	21
1.18	Consumo energético de los sistemas de control y flujo de agua [8]. . .	23
1.19	Sistema convencional de bombeo de agua VS Sistema de presión cons- tante [9].	24
2.1	Diseño 3D del banco experimental.	26
2.2	Diseño 3D de los tableros de control y puntos de conexión del sistema.	27
2.3	Diseño 3D del sistema de bombeo de agua.	27
2.4	Diagrama de bloques de funcionamiento de Sistema con sensor [7]. . .	28
2.5	Especificaciones de Variadores de frecuencia línea ABB. [1].	30
2.6	PLC S7-1500 [2].	34
2.7	Módulo de entradas analógicas para PLC S7-1500 [2].	35
2.8	Módulo de salidas analógicas para PLC S7-1500 [2].	35

2.9	Línea de programación del segmento 1 realizado en TIA Portal.	36
2.10	Línea de programación del segmento 2 realizado en TIA Portal.	36
2.11	Línea de programación del segmento 3 realizado en TIA Portal.	37
2.12	Línea de programación del segmento 4 realizado en TIA Portal.	37
2.13	Pines para conexión de variador de frecuencia ABB ACS355 [1].	38
2.14	Plano del acrílico ubicado en la parte superior del banco experimental.	43
2.15	Plano del acrílico ubicado en la parte central del banco experimental.	43
2.16	Diseño 3D del acrílico ubicado en la parte superior del banco experi- mental.	44
2.17	Diseño 3D del acrílico ubicado en la parte central del banco experi- mental.	44
2.18	Acrílico superior y central cortados y grabados con láser.	44
2.19	3D del acrílico ubicado en la parte superior con sus correspondientes equipos.	45
2.20	3D del acrílico ubicado en la parte central con sus correspondientes equipos.	45
2.21	Acrílicos colocados en el banco con sus respectivos equipos.	46
2.22	Diagrama de conexión de entradas digitales al controlador lógico pro- gramable.	46
2.23	Diagrama de conexión de salidas digitales y analógicas al controlador lógico programable.	47
2.24	Diagrama de fuerza del diagrama a presión constante.	47
2.25	Diagrama de fuerza del diagrama a presión constante.	48
3.1	Pulsadores para control manual de la bomba 1 y 2.	53
3.2	Velocidad máxima configurada para las bombas de agua.	53
3.3	Selector para el funcionamiento automático de las bombas de agua. .	54
3.4	Función dormir activada.	55
3.5	Bomba 2 activada y bomba 1 en reposo.	56
3.6	Bomba 1 activada y bomba 2 en reposo.	56
A.1	Plano en milímetros del acrílico superior.	62
A.2	Plano en milímetros del acrílico central.	63
B.1	Medición de voltaje y corriente L-L con Fluke 1735.	64
B.2	Medición de potencia con Fluke 1735 de 2-4 minutos.	64
B.3	Medición de potencia con Fluke 1735 de 16-18 minutos.	65
B.4	Medición de potencia con Fluke 1735 de 34-36 minutos.	65

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Datos técnicos del sensor de presión.	28
2.2	Datos técnicos de la bomba de agua.	29
2.3	Especificaciones técnicas del conductor eléctrico usado para el sistema de control [10].	32
2.4	Especificaciones técnicas del conductor eléctrico usado para el sistema de fuerza [10].	32
2.5	Costo de materiales implementados en banco experimental.	33
2.6	Asignación de entradas digitales al PLC.	34
2.7	Asignación de salidas digitales al PLC.	35
2.8	Configuración de parámetros del VFD.	39
3.1	Datos del sistema en arranque directo.	49
3.2	Datos del sistema con variador de frecuencia.	50

INTRODUCCIÓN

Los primeros dispositivos de bombeo que se crearon funcionaban de manera manual o recibían impulso de fuerzas naturales, como el viento; entre ellos se encuentran el Shaduf, la rueda hidráulica, el tornillo de Arquímedes, los molinos de viento para bombear agua, etc [11]. Con el avance del tiempo, el hombre mejoró las máquinas existentes e inventó así dispositivos más modernos, como la bomba eléctrica.

James Watt, a finales del siglo XVIII, creó la máquina de vapor, mientras que en el siglo XIX hubo un gran progreso de los motores térmicos, como eléctricos. Debido al desarrollo acelerado de la industria y al aumento de la población, las bombas eléctricas se volvieron imprescindibles para solucionar problemas relacionados con el abastecimiento de agua [11].

El uso del agua es esencial y fundamental para la vida de los seres humanos, y se destina principalmente al consumo doméstico, la industria, el riego agrícola y el suministro; el riego de las tierras de cultivo en el mundo representa el 70 % del agua que se emplea a nivel global [11]. El 20 % de la electricidad que se usa en el mundo se destina a los sistemas de bombeo, en donde el sector industrial consume entre el 25 % y el 50 % de la energía eléctrica [12].

Un aspecto crucial en los sistemas de bombeo y suministro de agua es la presión. A medida que se aumenta la presión, el agua puede viajar distancias más largas y alcanzar alturas elevadas. No obstante, si esta presión es excesiva, resulta en un mayor consumo de energía. La presión de agua óptima para el funcionamiento eficiente del sistema es la menor posible. Para lograr esto, se emplean diversos métodos convencionales de regulación de presión en los sistemas de bombeo. Entre estos métodos, se destacan la regulación de paso, la recirculación y el control cíclico. Estas técnicas no alteran la velocidad de las bombas, sino que únicamente mantienen la presión requerida, lo que lleva a que las bombas operen al máximo de su capacidad, conllevando a un uso innecesario de recursos por parte del sistema [13] [7] [8].

La creciente demanda de energía por el avance de la economía y la sociedad hace que sea necesario utilizar la tecnología para lograr un alto ahorro energético, y una alta calidad y seguridad en el abastecimiento de agua [14]. Una alternativa para resolver los inconvenientes que presentan los métodos tradicionales para regular el caudal de agua, es el bombeo a presión constante, que emplea dispositivos electrónicos para automatizar el sistema, sin embargo, el desconocimiento de las ventajas y el funcionamiento de este método ha limitado su uso frecuente en las áreas de mayor consumo [7].

Por lo tanto, el presente trabajo se centra en diseñar y construir un banco experimental con un sistema de control hidráulico de dos bombas a presión constante a pequeña escala, demostrando los beneficios energéticos que dicho sistema posee en comparación con las metodologías de control de flujo de agua comúnmente utilizadas en la sociedad.

Como punto de partida se ejecuta el diseño del banco, haciendo uso del programa Fusión 360, además, dicho diseño facilita la construcción del sistema de bombeo. En el segundo paso se fabrica el sistema mencionado, como también la instalación hidráulica y eléctrica, teniendo en cuenta cada uno de los elementos eléctricos y electrónicos necesarios con los cuales el sistema debe funcionar de manera eficiente y segura.

Entre los elementos más importantes a utilizar se encuentran las bombas de agua trifásicas, Control Logico Programable (PLC), variadores de frecuencia (VFD) que incluyen el controlador PID (Control Proporcional Integral Derivativo), transductor de presión, entre otros [14] [15]. El ultimo paso es la programación de los equipos de control y automatización, con lo cual se comprueba el funcionamiento del sistema de presión constante con doble bomba, asegurando de esta manera la ejecución de lo instalado y sobre todo manteniendo la seguridad del personal que manipula cada elemento del sistema, por el motivo que el proyecto realizado queda como material educativo para los estudiantes de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Justificación

En la actualidad en el país según el proyecto Ayuda en Acción, existe un 25 % de déficit de agua potable en zonas rurales, por lo cual edificios, comercios y viviendas recurren a almacenar agua en tanques o cisternas para uso doméstico, siendo necesario de un sistema de bombeo que usualmente opera mediante una bomba y tanques hidroneumáticos que se encargan de expulsar agua sin que se pierda presión en el sistema hidráulico.

A medida que la tecnología va creciendo es necesario un menor consumo energético, del cual se logra incorporar un sistema de presión de agua constante con variadores de frecuencia, en donde facilita el control de velocidad de giro de la bomba de agua llegando a automatizar los procesos, obteniendo de esta manera beneficios en el ahorro en todos los medios posibles, como en lo económico y energético. Por tal motivo, se da a conocer el sistema propuesto, debido que usualmente no es muy conocido por la sociedad, como consecuencia, su uso no es habitual, y las ventajas que brinda no son aprovechadas por los usuarios que hacen uso de un sistema de bombeo.

La Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca cuenta con un laboratorio de [PLC](#), donde se puede encontrar módulos de Automatización para llevar a cabo el proceso de aprendizaje práctico, siguiendo el lineamiento del sílabo de la carrera de Electricidad; y con el fin de promover una educación de calidad de los estudiantes con las herramientas necesarias, se diseña y construye un sistema de control de dos bombas a presión constante utilizando el [PLC](#) y variador de frecuencia para la interacción de elementos eléctricos-electrónicos usados en la vida cotidiana.

Objetivo General

Diseñar y construir un banco experimental equipado con un sistema automatizado para controlar el bombeo de agua a presión constante, con el fin de proporcionar una plataforma de estudio que permita analizar las ventajas enfocadas al área eléctrica que el sistema planteado posee.

Objetivos Específicos

- Diseñar mediante el software 3D, Fusión 360, el banco con el sistema de bombeo de agua a presión constante, teniendo en cuenta cada uno de los equipos, tanto hidráulicos como eléctricos requeridos para el funcionamiento.
- Fabricar lo plasmado en el diseño, considerando la parte estructural del banco en el cual se realizará las instalaciones hidráulicas y eléctricas de cada uno de los equipos necesarios para la ejecución adecuada del sistema mencionado.
- Realizar la configuración y programación del controlador lógico programable y variadores de frecuencia para posteriormente comprobar el funcionamiento adecuado y seguro del banco con sistema de control hidráulico de dos bombas a presión constante..

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Variador de Frecuencia

1.1.1. Definición

Un variador de frecuencia **VFD** constituye un dispositivo esencial empleado para regular y supervisar la velocidad de funcionamiento de bombas o motores. Su función principal radica en la capacidad de controlar la frecuencia de alimentación de entrada, ajustando así la velocidad de rotación de la bomba o motor en consonancia con los requisitos específicos del proceso en cuestión. Originalmente fueron desarrollados con el propósito fundamental de lograr eficiencia energética, los **VFD** se rigen de una interfaz operativa basada en microprocesadores para gestionar de manera precisa las órdenes recibidas a través de entradas analógicas digitales [16].

Este dispositivo se rige como un elemento clave en la optimización de procesos industriales, brindando la flexibilidad necesaria para adaptarse a diversas demandas operativas. Su capacidad para modular la frecuencia de operación no solo contribuye al ahorro de energía, sino que también posibilita una mayor eficiencia en la ejecución de tareas específicas. A través de la evolución tecnológica, los **VFD** han evolucionado para desempeñar un papel crucial en la mejora continua de la eficiencia y la sostenibilidad en entornos industriales, al tiempo que mantienen su función esencial de control de velocidad de manera precisa y eficaz [17].



Figura 1.1: Variador de Frecuencia ABB ACS355-03E-02A4-2 [1].

1.1.2. Principio de funcionamiento

Los variadores de frecuencia, esenciales para el control eficiente de accionamientos trifásicos, operan mediante tres fases distintas que posibilitan la regulación precisa de la velocidad en motores o bombas. Estos dispositivos, conectados a redes de alimentación de 220V y 380V con una frecuencia de 50/60 Hz, desempeñan un papel crucial al garantizar que las máquinas no operen a velocidades superiores a las necesarias. Este proceso se desenvuelve a través de tres etapas claves, cada una contribuyendo de manera específica al funcionamiento integral del variador [16].

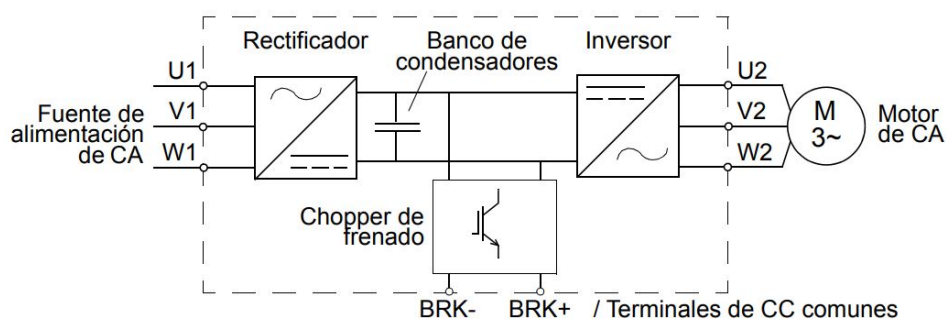


Figura 1.2: Diagrama de principio de funcionamiento del variador de frecuencia [1].

En la primera etapa, conocida como la “Etapa Rectificadora”, la red de suministro se aprovecha para transformar la tensión alterna en tensión continua. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de dispositivos como diodos rectificadores y

tiristores, que desempeñan un papel crucial en la conversión eficiente de la energía eléctrica [18].

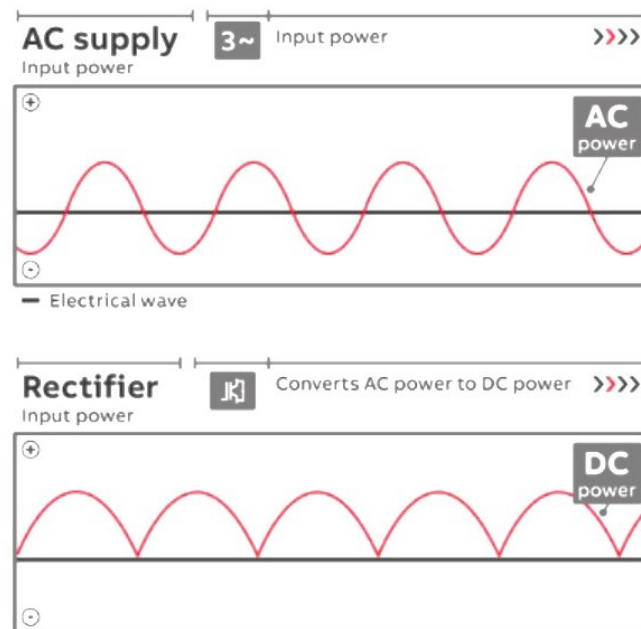


Figura 1.3: Conversión entrante de CA en CC [1].

A continuación, en la “Etapa de Bus Continua o Intermedia”, la tensión rectificada experimenta un proceso de suavización. Esta fase, vital para el funcionamiento continuo y estable del sistema, implica la reducción de armónicos mediante el empleo de condensadores de gran capacidad. El resultado es una tensión continua que se mantiene estable y propicia condiciones ideales para el siguiente paso del proceso [16].

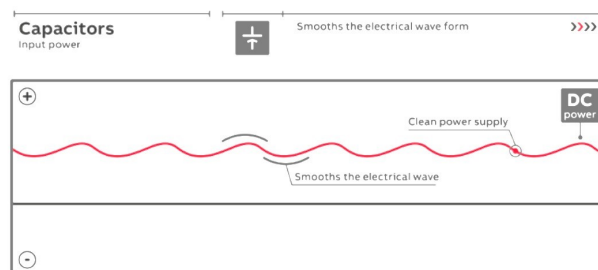


Figura 1.4: Suavizada onda DC con filtros [1].

La última fase, conocida como la “Etapa Inversora”, representa la conversión final de la tensión continua estable en tensión alterna con frecuencia variable. Este proceso se logra mediante la modulación de ancho de pulsos (PWM), un método

eficaz controlado por transistores bipolares BJT, tiristores SCR, IGBTs, entre otros dispositivos. Esta etapa es fundamental para lograr una regulación precisa de la velocidad del motor o bomba, permitiendo adaptarse de manera óptima a los requisitos cambiantes del proceso industrial. Así, los variadores de frecuencia se consolidan como elementos esenciales en la optimización energética y el control avanzado de sistemas industriales [17].

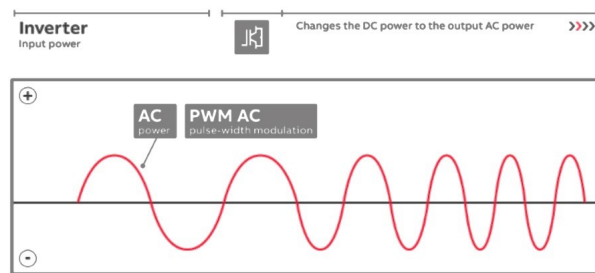


Figura 1.5: Conversión CC en CA [1].

1.1.3. Ventajas

La aplicación de variadores de frecuencia en sistemas de bombeo ofrece diversas ventajas significativas, entre las cuales se destacan [7] [17] [16]:

- Existe un ahorro energético disminuyendo gastos de energía innecesarios ya que la bomba consume solo lo que necesita prolongando su vida útil mecánica.
- Permite reducir los golpes de ariete fenómeno que ocurre por detener y arrancar a la maquina bruscamente.
- Puede controlar los tiempos de arranque y parada.
- No es necesario de un tanque hidroneumático ya que el **VFD** se encarga de mantener presión constante en el sistema hidráulico.
- Puede ser controlado a distancia y acoplado a un sistema automático.
- Protege el motor controlando la corriente, sobrecarga y sobreintensidad instantánea con un sistema de monitoreo y protección contra perturbaciones.

1.1.4. Aplicaciones

Los variadores de frecuencia o velocidad desempeñan un papel fundamental en diversas aplicaciones industriales, proporcionando flexibilidad y eficiencia en el control de motores y sistemas. Algunas de las numerosas aplicaciones incluyen [16]:

- **Sistemas de Bombeo:** En aplicaciones de bombeo, los variadores de frecuencia permiten ajustar la velocidad de las bombas según la demanda real, optimizando así el consumo de energía y minimizando los golpes de ariete.
- **Ventilación y Climatización:** En sistemas de climatización y ventilación, los variadores de frecuencia ajustan la velocidad de los motores para adaptarse a las condiciones cambiantes, lo que resulta en un control más preciso y una mayor eficiencia energética.
- **Procesos de Manufactura:** En entornos de fabricación, los variadores de velocidad se utilizan para controlar la velocidad de motores en máquinas herramientas, transportadores y otros equipos, permitiendo una producción más precisa y adaptable.
- **Sistemas de Elevación:** En aplicaciones de grúas y ascensores, los variadores de frecuencia brindan un control suave y preciso de la velocidad, mejorando la seguridad y reduciendo el desgaste mecánico.
- **Industria Minera:** En maquinaria utilizada en la minería, los variadores de frecuencia se aplican para controlar la velocidad de motores en equipos como transportadores, trituradoras y molinos, optimizando la eficiencia y el rendimiento.
- **Sistemas de Tratamiento de Aguas:** En instalaciones de tratamiento de aguas, los variadores de frecuencia se utilizan en bombas y sistemas de agitación, permitiendo ajustar la velocidad según las necesidades de tratamiento, ahorrando energía y prolongando la vida útil de los equipos.
- **Maquinaria Textil:** Los **VFD** facilitan la producción eficiente y adaptable en la industria textil al controlar la velocidad de los motores de las máquinas de tejido, hilar y teñir.

- **Sistemas de Transporte:** En sistemas de transporte automatizado, como cintas transportadoras, los variadores de frecuencia garantizan un control minucioso de la velocidad y facilitan la gestión eficiente de la logística.
- **Procesos Químicos:** En la industria química, los variadores de frecuencia se utilizan en bombas y agitadores para controlar la velocidad en procesos de mezcla y transferencia, mejorando la precisión y la eficiencia.

1.1.5. Macros de Aplicación

Para diferentes aplicaciones, es necesario establecer algunas conexiones de control predeterminadas, que incluyen entradas/salidas digitales y analógicas. Estas conexiones, conocidas como "macros", son conjuntos de parámetros preprogramados. Cuando se inicia el variador de frecuencia, el usuario puede seleccionar una de estas macros, lo que permite realizar ajustes básicos utilizando el parámetro 9902, denominado "MACRO DE APLICACIÓN" [1]. Algunas de las macros disponibles en un [VFD ACS355](#) son:

1. Estándar ABB.
2. 3 hilos.
3. Alterna.
4. Potenciómetro del motor.
5. Manual/Automático.
6. Control [PID](#).
7. Control del par.
8. Modbus AC500.

1.2. Transductor de presión

Un transductor de presión, a veces llamado sensor de presión o transmisor de presión es un dispositivo utilizado para medir la presión de un fluido, como líquidos o gases. Su función principal es convertir la presión en una señal eléctrica analógica de 4

- 20mA proporcional que se puede medir y registrar. Los transductores de presión son componentes esenciales en una amplia gama de aplicaciones industriales, científicas y comerciales. Los transductores de presión miden la presión en términos de fuerza por unidad de área. Esto se expresa generalmente en unidades de presión como pascales (Pa), bares, libras por pulgada cuadrada (psi) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) [7].

$$P = \frac{F}{S} \quad (1.1)$$

Donde:

P: Presión

F: Fuerza

S: Superficie



Figura 1.6: Transductor de presión de 0-1MPa.

1.2.1. Tipos de mediciones de presión

Para medir la presión se instala un transductor a la salida de las bombas, que puede convertir mencionado parámetro en una señal eléctrica que es interpretada por el PLC; cabe mencionar que el sensor de presión funciona en lazo cerrado que proporciona retroalimentación al sistema [7]. Existen diferentes tipos de sensores de presión, por ejemplo:

- Sensor de presión absoluta: Mide la presión con respecto al vacío.
- Sensor de presión relativa: Mide la presión en relación con la presión atmosférica.
- Sensor de presión diferencial. Mide la presión con la diferencia entre un valor determinado de presión con otro de referencia.

Para elegir el transductor de presión que mejor se acople y funcione de manera adecuada en el sistema, se debe tener en cuentas varias consideraciones importantes [19]:

- Se necesita saber si se requiere determinar la presión manométrica o absoluta.
- Seleccionar la tecnología del sensor: Mecánico, electromecánico, neumático y electrónico.
- Tener en cuenta las condiciones normales de funcionamiento y posibles fluctuaciones, lo cual facilita la elección del sensor más adecuado que cumpla con el rango de presión que se requiere medir.
- Conocer la configuración del sensor que se necesita para la instalación.

1.3. Controlador lógico programable

1.3.1. Definición

Un PLC, también conocido como controlador lógico programable, es un dispositivo electrónico que puede controlar una variedad de máquinas mediante entradas/salidas digitales o analógicas. Emplea una memoria interna para almacenar instrucciones, permitiendo la ejecución de funciones específicas como lógica, secuencias, control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas. Este dispositivo también puede ser definido como una computadora industrial que incorpora un hardware y software particulares [20] [21].



Figura 1.7: PLC S7-1500/ET 200MP [2].

1.3.2. Componentes

Los elementos que conforman un PLC pueden variar dependiente del modelo y fabricante. Actualmente en el mercado se pueden encontrar varios modelos de controladores lógicos programables de la marca de Siemens, tales como: LOGO, S7-1200, S7-1500, S7-200, S7-300, entre otros. Los componentes principales son [7]:

- CPU: Responsable de tomar decisiones que afectan el control de la máquina o proceso. Recibe información de los equipos de censado y toma decisiones lógicas de acuerdo con el programa creado y almacenado en la memoria [21].
- Módulo de entrada y salida: Atraves de las entradas ingresa las señales obtenidas en el exterior mediante diferentes equipos, mientras que por las salidas del PLC se emite la señal que controla el comportamiento de las maquinas o procesos [7].
- Memoria: Es el lugar en donde se encuentra almacenado el programa creado por el usuario [22].

1.3.3. Lenguaje de programación

Existe uno o más lenguajes para programar un PLC, esto depende del tipo de Controlador Lógico Programable que se esté utilizando. Los lenguajes de programación pueden ser gráficos y textuales, en donde el lenguaje gráfico hace uso de simbologías para crear el programa que satisfaga las necesidades requeridas, mientras que el lenguaje textual utiliza caracteres [21] [22].

Lenguajes Gráficos:

- Ladder.
- Bloques de función.
- Grafcet.

Lenguajes textuales:

- Booleano.
- Texto estructurado (Semejante a Pascal).

1.3.4. Ventajas del uso de un controlador lógico programable

Las bondades proporcionadas por un Controlador Lógico Programable son de vital importancia, especialmente en entornos industriales, y los sistemas de presión constante no constituyen una excepción [7]:

- Optimiza la eficiencia del sistema.
- Posibilita la supervisión y control de múltiples máquinas o equipos.
- Las dimensiones compactas del dispositivo simplifican su instalación.
- Sustituye en gran medida la complejidad de la lógica cableada.
- Ofrece flexibilidad para la modificación o sustitución de programas almacenados.
- Permite la expansión de módulos en caso de necesitar más entradas, salidas o funciones especializadas.

1.4. Sistemas de bombeo de agua

El elemento central de un sistema de bombeo es la bomba, encargada de generar la presión necesaria para impulsar el agua a través de un conjunto de tuberías que conectan la fuente de agua con un destino específico; cabe destacar que los sistemas de bombeo constituyen aproximadamente el 20 % de la demanda global de energía eléctrica en la actualidad [12]. Estos sistemas se diseñan para diversas aplicaciones, como el suministro de agua potable, el drenaje y, en particular, el riego agrícola, siendo responsables de casi el 70 % del consumo eléctrico en todo el mundo [12].

En sistemas donde se requiere una mayor capacidad de bombeo o donde la confiabilidad y la redundancia son críticas, como en sistemas de abastecimiento de agua en hospitales, plantas industriales o estaciones de bombeo, se hace uso de un sistema multibombas, que implica el uso de múltiples bombas en paralelo para aumentar la capacidad de bombeo o para proporcionar redundancia en caso de fallo de una de las máquinas. Cada bomba funciona de manera independiente y se activa según las necesidades del sistema [23].

1.4.1. Estadísticas de consumo

Como se indicó con anterioridad, alrededor del 20 % del consumo global de electricidad se asigna a los sistemas de bombeo, con la industria absorbiendo entre el 25 % y el 50 % de dicha energía eléctrica [12].

El suministro de electricidad en Ecuador se destina al transporte, industria, sector residencial, comercial y otros sectores. El Ministerio de Energía y Minas de Ecuador proporciona las siguientes estadísticas de consumo [3]:

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Var. (%) 2022/2021	Var. (%) promedio anual 2012/2022
TRANSPORTE(1)	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	2,4	1,2
INDUSTRIA(2)	7.993	8.031	8.419	8.580	8.919	9.469	9.998	10.390	10.143	11.388	11.802	3,6	4,0
RESIDENCIAL	5.629	5.881	6.364	6.928	7.105	7.298	7.400	7.656	8.063	7.959	7.833	-1,6	3,4
COMERCIAL, SERV. PÚBL.(3)	5.050	5.545	6.031	6.438	6.633	6.796	6.939	7.244	6.648	6.991	7.387	5,7	3,9
OTROS SECTORES	473	623	579	594	372	399	559	515	553	628	764	21,7	4,9
CONSUMO ENERGÉTICO	19.156	20.091	21.403	22.550	23.039	23.973	24.908	25.816	25.418	26.976	27.797	3,0	3,8

Figura 1.8: Consumo de electricidad por sector (GWh) [3].

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Var. (%) 2022/2021	Var. (%) promedio anual 2012/2022
TRANSPORTE(1)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	-0,7	-2,5
INDUSTRIA(2)	41,7	40,0	39,3	38,0	38,7	39,5	40,1	40,2	39,9	42,2	42,5	0,6	0,2
RESIDENCIAL	29,4	29,3	29,7	30,7	30,8	30,4	29,7	29,7	31,7	29,5	28,2	-4,5	-0,4
COMERCIAL, SERV. PÚBL.(3)	26,4	27,6	28,2	28,6	28,8	28,3	27,9	28,1	26,2	25,9	26,6	2,6	0,1
OTROS SERVICIOS	2,5	3,1	2,7	2,6	1,6	1,7	2,2	2,0	2,2	2,3	2,7	18,1	1,1
CONSUMO ENERGÉTICO	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	-

Figura 1.9: Estructura del consumo de electricidad (%) [3].

Para obtener un punto de vista más amplio sobre el consumo energético de las bombas de agua, se toma como referencia las estadísticas obtenidas por el Ministerio de Energía y Minas de Perú.

Según las estadísticas de CENERGIA, en el sector de la agroindustria las bombas de agua consumen el 16 % de energía eléctrica [4]:

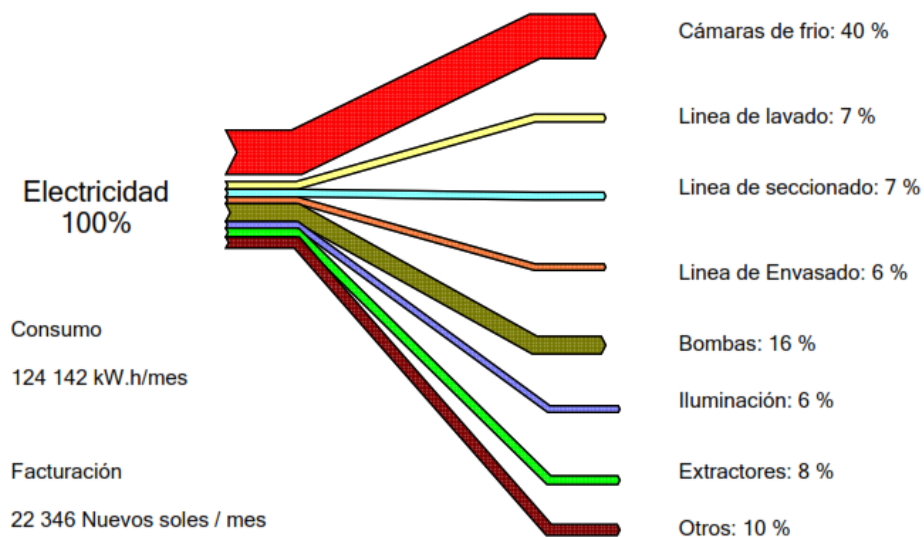


Figura 1.10: Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en el sector de la agroindustria [4].

En los edificios públicos las bombas de agua consumen el 7% de energía eléctrica [5]:

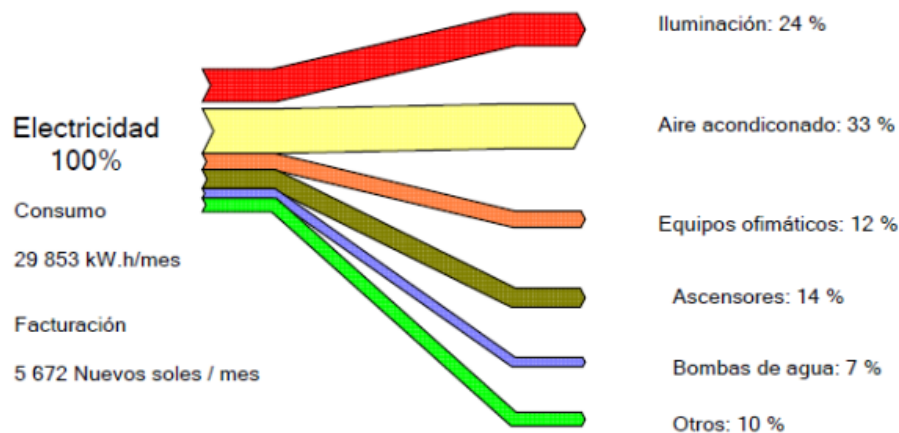


Figura 1.11: Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en edificios públicos [5].

En el sector comercial las bombas de agua consumen el 6% de energía eléctrica [6]:

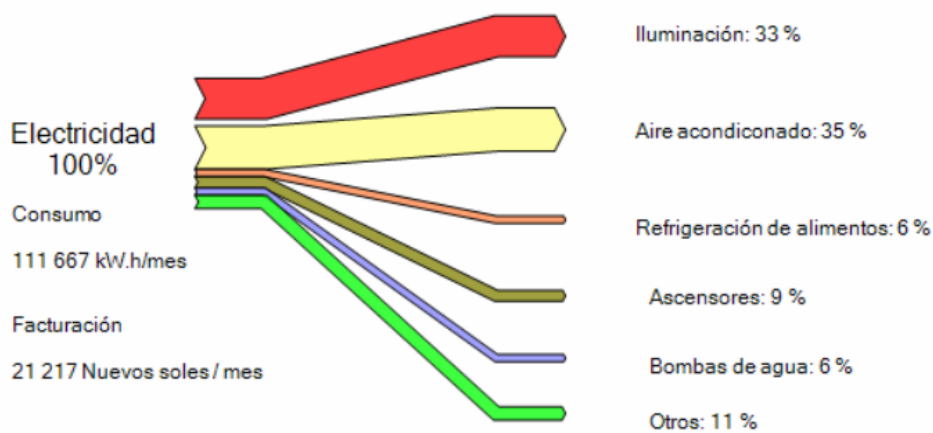


Figura 1.12: Distribución porcentual del consumo de energía eléctrica en el sector comercial [6].

1.4.2. Clasificación de las bombas

La clasificación de bombas es esencial para comprender la variedad de tipos y sus aplicaciones para diferentes fluidos. La gama de bombas disponibles cubre todo, desde líquidos hasta productos químicos y aceites. La elección del tipo de bomba se basa en la compatibilidad del material con el líquido bombeado, teniendo en cuenta aspectos como la viscosidad y la temperatura [7].

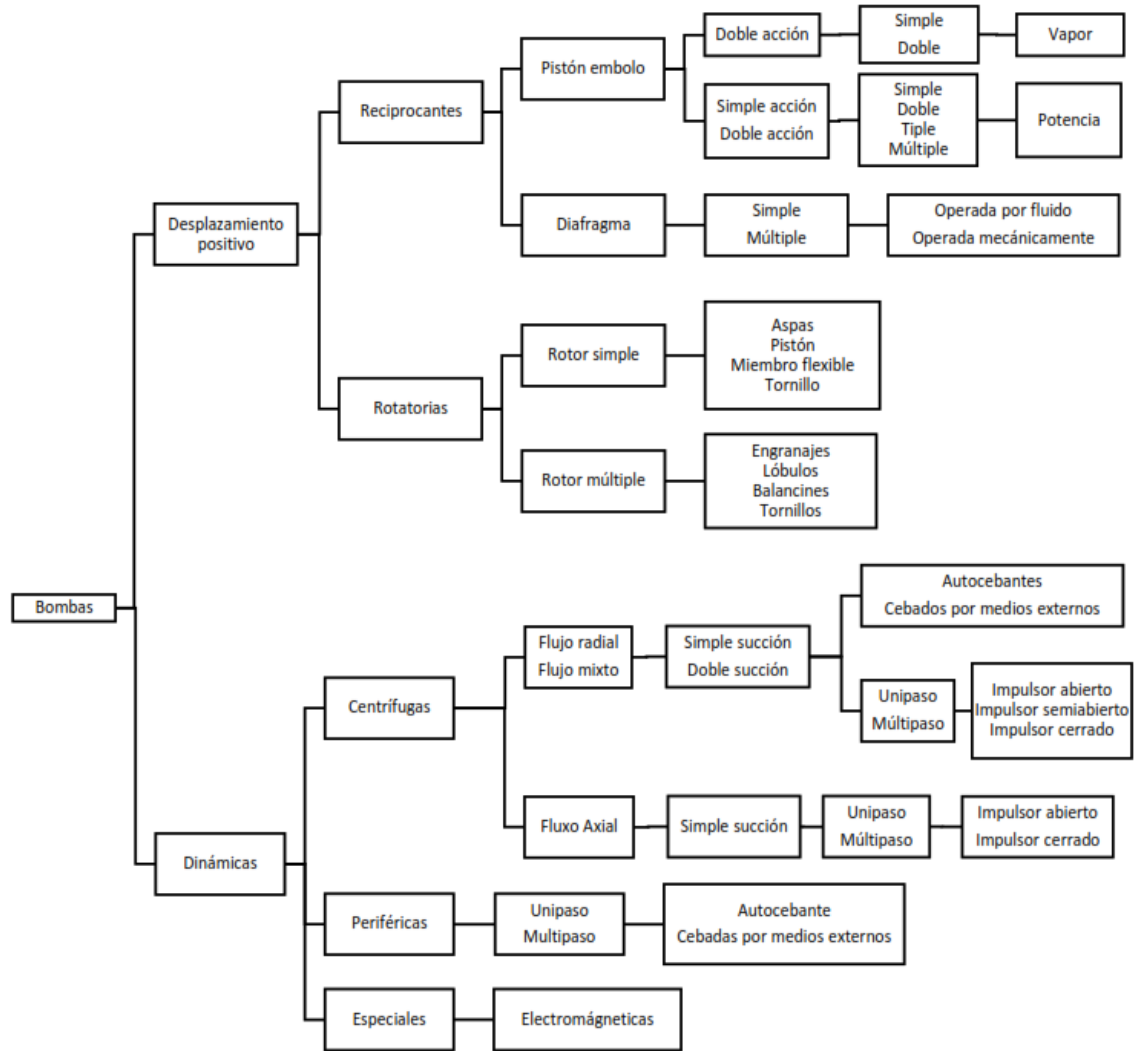


Figura 1.13: Clasificación de bombas [7].

Impulsadas por motores eléctricos trifásicos de velocidad variable, las bombas funcionan bien en condiciones extremas sin pérdida de energía, específicamente cuando el caudal se encuentra entre el 50 % y el 100 % del diseño y al menos el 50 % de la carga de la bomba se debe a pérdidas por fricción, los variadores de velocidad pueden reducir significativamente los costos de energía, aumentando la eficiencia y confiabilidad del sistema, lo que resulta en una mayor producción [7].

1.4.3. Métodos de control de presión y flujo de agua

Para lograr ahorros significativos de energía en el sistema de bombeo, es necesario considerar la regulación del caudal y presión del agua; este control se puede lograr mediante dispositivos eléctricos o mecánicos [8]. Algunos métodos para controlar estas variables se describen a continuación.

1.4.3.1. Regulación de paso

En situaciones donde se encuentran operando equipos de bombeo que funcionan a flujo variable, es necesario reducir el caudal, esto se logra mediante el uso de válvulas que cierran gradualmente el paso del agua hasta alcanzar el flujo deseado, y manteniendo la presión del agua en el sistema dentro de los límites establecidos [24].

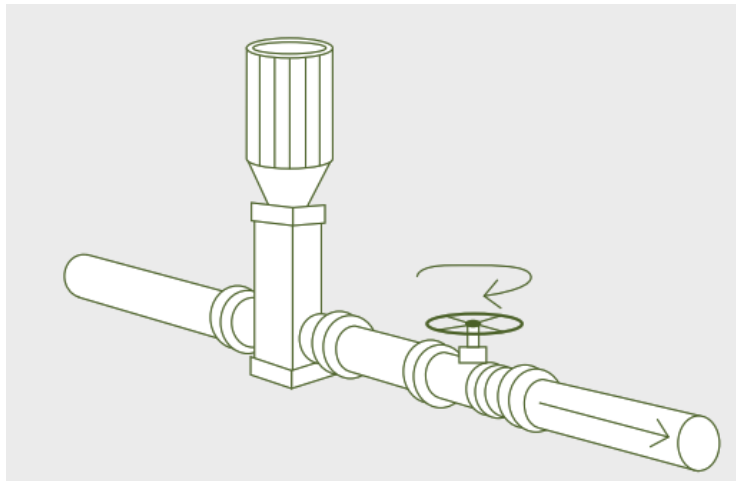


Figura 1.14: Método de control mediante regulación de paso [8].

1.4.3.2. Recirculación o Desvío

Otra forma para reducir el flujo es colocar una tubería paralela al motor, con un sistema de válvulas que conecte la parte de absorción con la de expulsión que se ajusta según sea necesario [24].

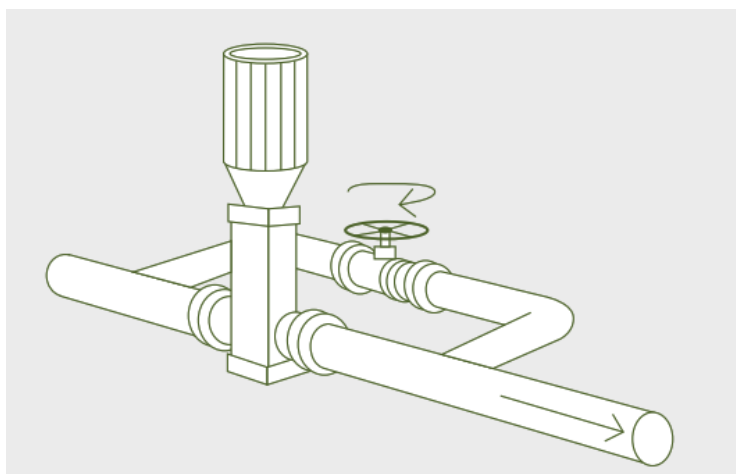


Figura 1.15: Método de control mediante recirculación [8].

1.4.3.3. Control cíclico o Control On-Off

Existe otra solución más sencilla para regular el flujo, este método consta de dispositivos que permiten encender o apagar el motor de la bomba dependiendo del caudal requerido [24].

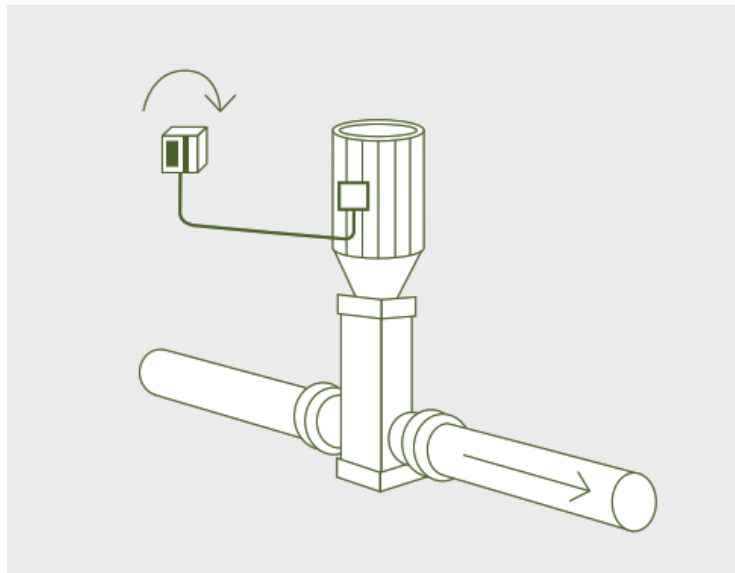


Figura 1.16: Método de control cíclico [8]

1.4.3.4. Control con VFD

Los métodos mecánicos causan un desgaste innecesario del equipo, pero principalmente desperdician energía eléctrica [8]. Debido a estos inconvenientes, el uso de un VFD es una buena solución, por el motivo que ajusta la velocidad de la primera bomba, a la vez conecta o desconecta automáticamente la segunda; los ajustes los realiza según la presión que requiere el sistema [25]. Como consecuencia se obtiene beneficios en la reducción de dióxido de carbono, ahorro de energía eléctrica, así como un sistema más eficiente y confiable.

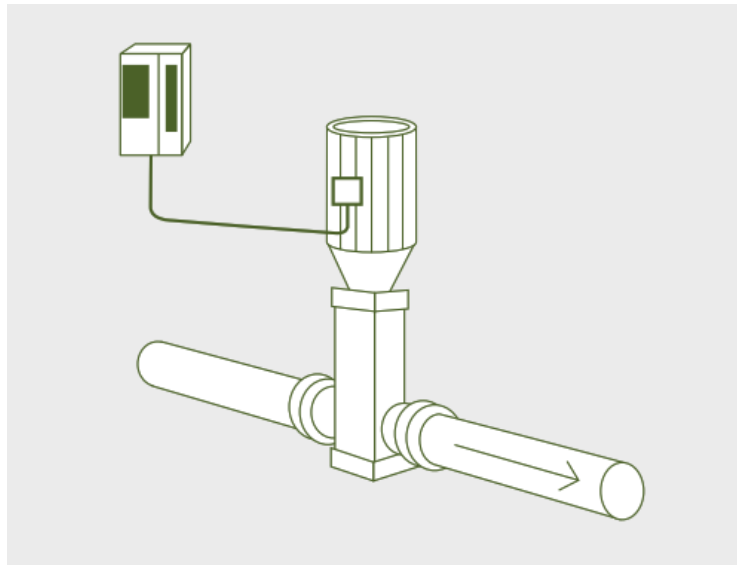


Figura 1.17: Método de control mediante variador de frecuencia [8].

Las leyes de afinidad son las ecuaciones que expresan el rendimiento de la bomba en relación con la velocidad, las cuales son:

- Caudal: Se usa para calcular la cantidad de agua que fluye por una tubería. Se expresa en unidades de volumen por unidad de tiempo, como galones por minuto, metros cúbicos por hora y litros por segundo. [26].

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

En donde:

$Q_{1,2}$ = Caudal

$n_{1,2}$ = Velocidad de la bomba

- Altura: La medición de la altura en un sistema es necesario para que la presión sea uniforme en todas las ubicaciones y el sistema funcione de manera óptima, independientemente de las diferencias en la elevación. Se expresa en unidades de longitud, como metro [26].

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (1.3)$$

En donde:

$h_{1,2}$ = Altura

$n_{1,2}$ = Velocidad de la bomba

- **Potencia:** La potencia define el trabajo de la bomba en desplazar un fluido, este parámetro es importante debido que podría afectar a la eficiencia energética del sistema por arranques, y paradas bruscas como a la operación de los componentes eléctricos y electrónicos involucrados. Se expresa en unidades de tiempo, como vatio [26].

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (1.4)$$

En donde:

$P_{1,2}$ = Potencia $n_{1,2}$ = Velocidad de la bomba

1.4.4. Problemática de los métodos convencionales de control de presión y flujo de agua

Las metodologías tradicionales utilizan distintos elementos y configuraciones para regular el caudal. Además, cada método de control requiere de cierta potencia, es en donde radica el principal problema, debido que los métodos convencionales consumen energía eléctrica de manera excesiva por el motivo que la bomba trabaja al 100 % de su velocidad [24].

Un ejemplo de lo mencionado es el control de regulación de paso, al momento de regular el caudal, lo que se está ejecutando es una modificación en la curva del sistema de bombeo para poder adaptarse al nuevo punto de funcionamiento de la bomba de agua. En la figura que se presenta a continuación se observa la energía perdida al hacer uso del método de regulación de paso para controlar la presión y flujo de agua [24].

En las curvas presentadas para el método de regulación de paso, recirculación y control cíclico, se aprecian pérdidas de energía, en donde Q1 exhibe el flujo de la bomba al 100 % de su capacidad, mientras que Q2 representa el flujo requerido, es decir un caudal menor al Q1 [7]. En el caso del control mediante VFD se visualiza una modificación progresiva en la curva de la bomba de agua hasta acoplarse a la curva del sistema, esto sucede debido que se está actuando directamente en el control de la velocidad de la bomba, como consecuencia se obtiene un ahorro en el consumo de energía eléctrica [24].

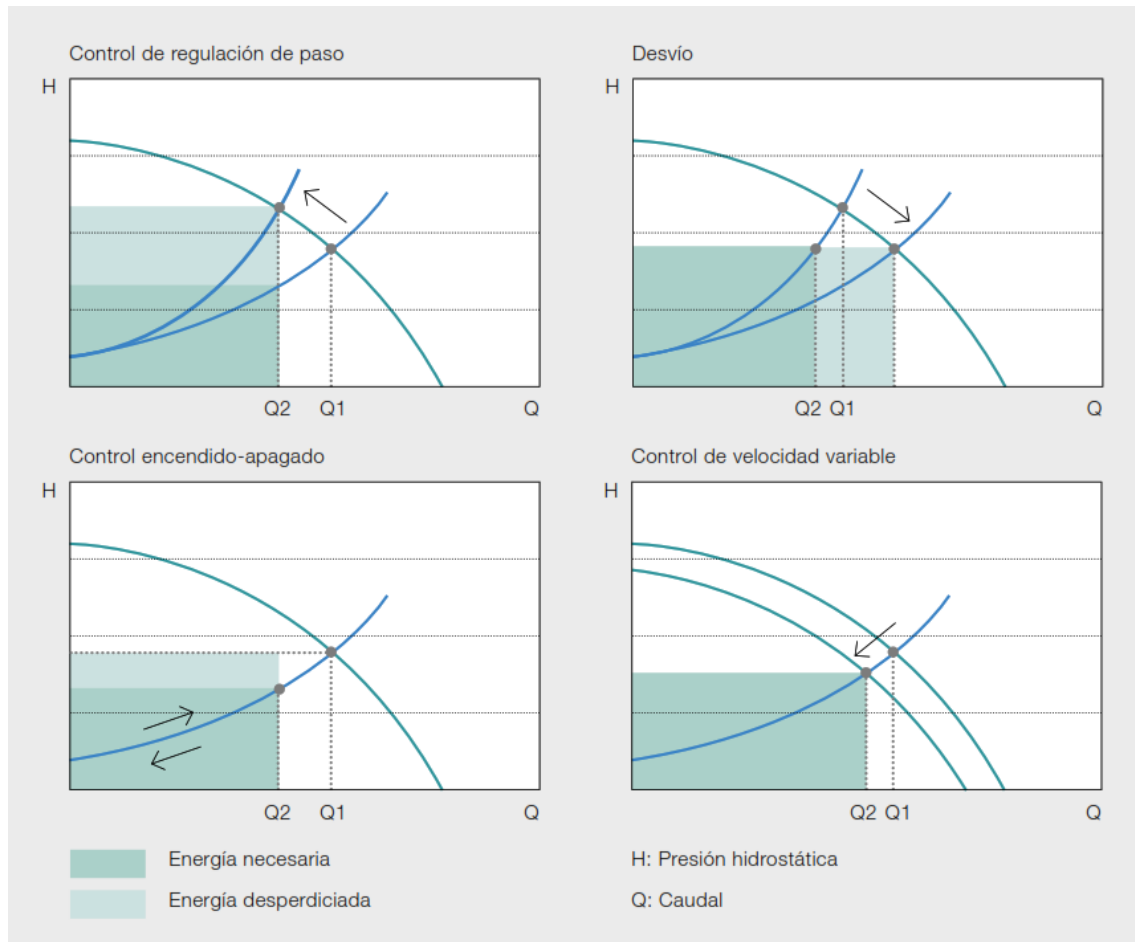


Figura 1.18: Consumo energético de los sistemas de control y flujo de agua [8].

1.4.5. Sistema de presión constante

Un sistema de bombeo de agua está conformado por un conjunto de tuberías, uniones de tubos y una o más bombas que permiten la circulación de cierta cantidad de agua para cubrir la demanda establecida que está en función de la presión y caudal [24].

Hoy en día, hay diversas maneras de suministrar agua a un lugar específico, y a medida que avanza la tecnología, se emplean dispositivos como transductores de presión, controladores lógicos programables, variadores de frecuencia para regular y controlar las bombas de agua los cuales desempeñan un papel fundamental en la automatización [20].

Al ejercer control sobre las bombas, se regula la presión en el flujo del sistema hidráulico, lo que conlleva ventajas significativas en cuanto a la eficiencia y el consumo de energía. Al reducir la velocidad de las bombas por debajo de su velocidad

nominal, se logra un menor consumo energético, alargando de esta manera la vida útil de los equipos gracias a los arranques suaves y disminuyendo la probabilidad de problemas mecánicos [20]. Los sistemas de bombeo a presión constante se clasifican en los dos siguientes tipos.

- Sistema de bombeo contra red cerrada a velocidad fija: Está compuesto por dos o más bombas que funcionan juntas a velocidad constante para cubrir las necesidades de consumo de la red de servicio en el momento [27].
- Sistema de bombeo con red cerrada a velocidad variable: Son sistemas en los que la bomba ajusta su velocidad de funcionamiento según la demanda de la red de servicio [27].

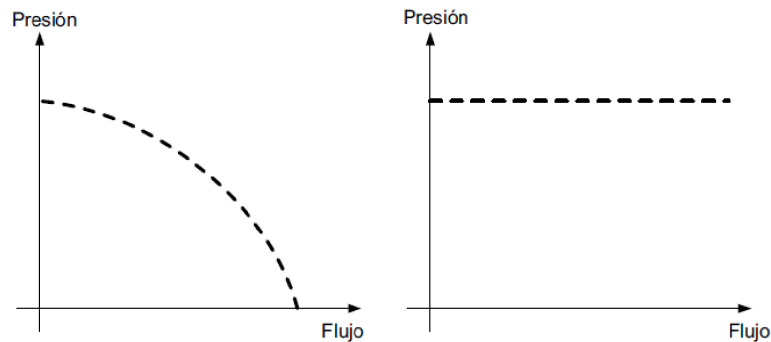


Figura 1.19: Sistema convencional de bombeo de agua VS Sistema de presión constante [9].

1.4.5.1. Ventajas

- Ahorro energético y disminución del consumo hasta un 50%, debido que las bombas son controladas por los VFD, los cuales ajustan la velocidad en la que están trabajando las bombas de agua de acuerdo con el consumo y parámetros establecidos [7].
- Prolongación de la vida útil de los motores de las bombas [7].
- Evita golpes de ariete en las tuberías, aquel factor daña las válvulas de retención de agua al igual que los accesorios del sistema [7].

CAPÍTULO 2

MARCO METODOLÓGICO

2.1. Fase de diseño

Esta etapa se centra en el diseño 3D, dimensionamiento y selección de los equipos que conforman el banco experimental, con el fin de estudiar y controlar el sistema hidráulico de dos bombas operando a presión constante. Este proyecto se enfoca en aplicar tecnologías modernas, especialmente utilizando un PLC y dos VFD, con el objetivo principal de analizar la eficiencia energética en la operación del sistema mencionado.

2.1.1. Diseño de sistema en 3D

El diseño 3D fue creado utilizando el software Autodesk Fusion 360, reconocido como uno de los programas de modelado más completos e intuitivos disponibles en el mercado [28]. Es conocida por su enfoque integrado, que permite a los usuarios realizar una variedad de tareas de diseño y fabricación en una única plataforma. Además de crear modelos tridimensionales, Fusion 360 permite realizar una variedad de simulaciones, algunas de las cuales incluyen las siguientes [28]:

- Análisis de estrés estático
- Análisis de frecuencia modal
- Análisis térmico
- Optimización de forma
- Simulación de eventos

- Análisis de estrés estático no lineal
- Análisis de pandeo estructural análisis de estrés térmico

La elección de este software no sólo simplificó la creación del banco experimental, sino que también proporcionó una representación detallada y realista del sistema hidráulico propuesto. Utilizando esta plataforma se creó una representación virtual, que fue el punto de partida para la materialización física del sistema.

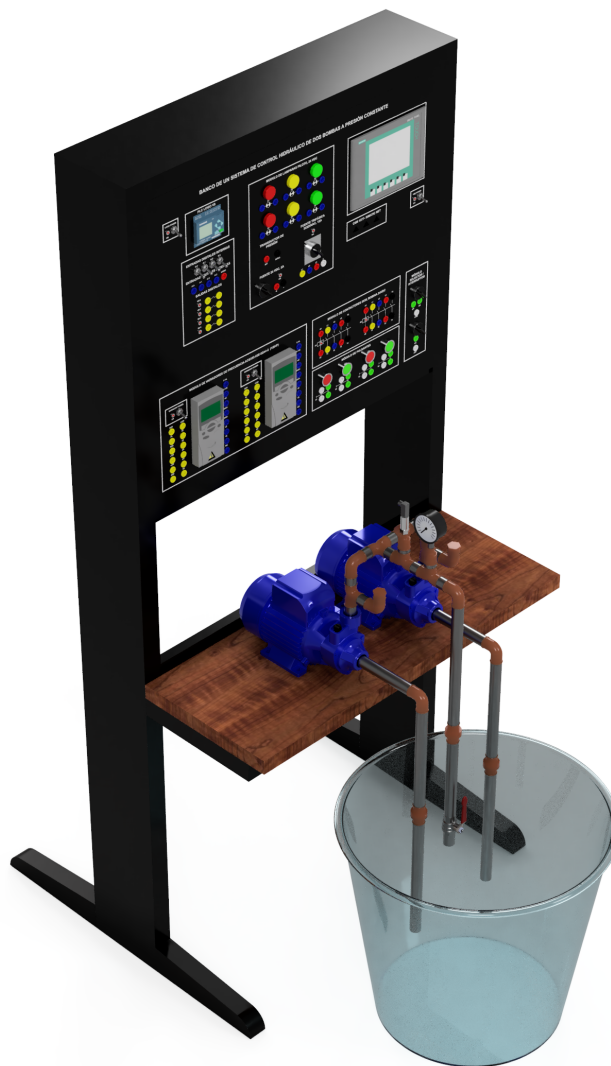


Figura 2.1: Diseño 3D del banco experimental.



Figura 2.2: Diseño 3D de los tableros de control y puntos de conexión del sistema.

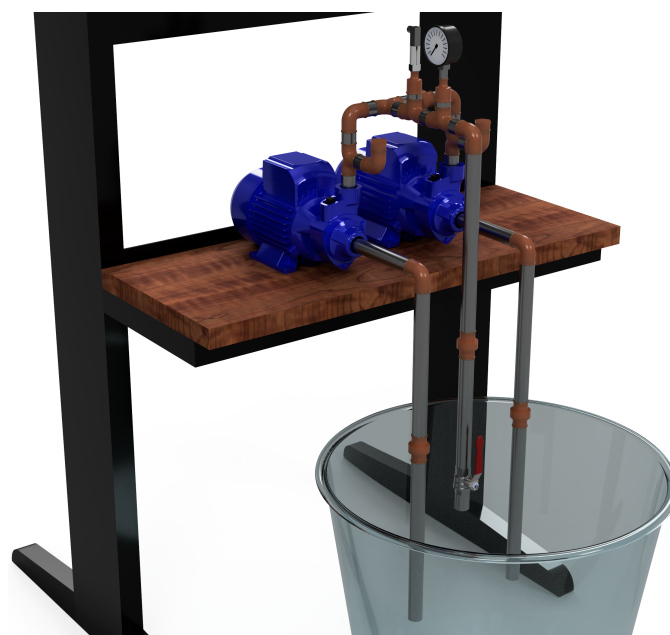


Figura 2.3: Diseño 3D del sistema de bombeo de agua.

2.1.2. Dimensionamiento y selección de equipo

■ Sensor de Presión

Se estimó que la retroalimentación del sistema sería facilitada mediante un sensor de presión, el cual transformaría una señal física, medida en unidades de presión, en una señal eléctrica analógica expresada en amperios dentro de un rango de 4 a 20 mA, esta señal sería interpretada por el PLC. La ubicación del sensor de presión se estableció en la salida del sistema hidráulico con el fin de capturar la retroalimentación de presión en las salidas de las bombas, dando lugar al siguiente diagrama de bloques de funcionamiento.

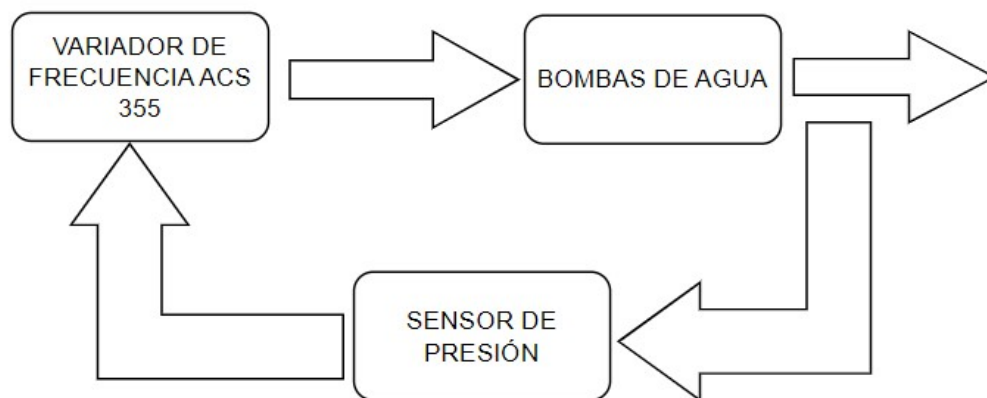


Figura 2.4: Diagrama de bloques de funcionamiento de Sistema con sensor [7].

El sensor de presión está equipado con una conexión hidráulica de tipo G1/4", mientras que en su aspecto eléctrico opera con una fuente de alimentación de 24V. El sensor tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 2.1: Datos técnicos del sensor de presión.

Sensor de Presión	
Descripción	Detalle
Código	B07HL6NVK6
Tensión de alimentación	8-32 Vdc
Rango de presión	0-1 MPA
Salida de corriente	4-20 mA
Salida de tensión	0-5 Vdc
Señal de salida	Analógica
Calibre de conductor	1xM12
Conexión hidráulica	G1/4"

La conversión de la unidad de presión de Megapascal (MPa) a libras por pulgada cuadrada (psi) se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$PSI = MPa * 145,038 \quad (2.1)$$

■ Bombas de agua

El sistema está compuesto por dos bombas de agua periféricas cuya función principal es mantener la presión constante en el sistema de bombeo de agua. Estas bombas son gestionadas a través de variadores de frecuencia que ajustan su velocidad de funcionamiento de acuerdo con la demanda del sistema. Las características de estas bombas son las siguientes:

Tabla 2.2: Datos técnicos de la bomba de agua.

Descripción	Detalle
Marca	Pedrollo
Potencia	1/2HP
Alimentación	Trifásica
Voltaje	220 Vac
RPM	3450
Frecuencia	60 Hz

■ Variador de frecuencia

El variador de frecuencia se encargará de ajustar la velocidad de las bombas, incrementándola o reduciéndola según la presión requerida en la salida del sistema hidráulico. En el entorno laboral, es necesario tener en cuenta diversos factores al elegir el variador de frecuencia, incluyendo:

- Voltaje de alimentación.
- Potencia.
- Corriente.
- Aplicación.

Para la selección del adecuado variador nos guiaremos en el manual de la marca ABB, seleccionando la alimentación trifásica de entrada a 220VAC y potencia de nuestra bomba de agua:

Podemos determinar la velocidad de la bomba al variar su frecuencia utilizando los datos de placa, que indican una frecuencia nominal de 60Hz, un número

Tipo	Entrada ³⁾		Entrada con reactancia ³⁾		Salida					Bas-tidor
	I_{1N}	I_{1N} (480 V) 4)	I_{1N}	I_{1N} (480 V) 4)	I_{2N}	$I_{2,1}$ min/10 min 2)	I_{2max}	P_N		
								kW	CV	
$x = E/U$ ¹⁾	A	A	A	A	A	A	A			
Monofásico $U_N = 200...240$ V (200, 208, 220, 230, 240 V)										
01x-02A4-2	6,1	-	4,5	-	2,4	3,6	4,2	0,37	0,5	R0
01x-04A7-2	11	-	8,1	-	4,7	7,1	8,2	0,75	1	R1
01x-06A7-2	16	-	11	-	6,7	10,1	11,7	1,1	1,5	R1
01x-07A5-2	17	-	12	-	7,5	11,3	13,1	1,5	2	R2
01x-09A8-2	21	-	15	-	9,8	14,7	17,2	2,2	3	R2
Trifásico $U_N = 200...240$ V (200, 208, 220, 230, 240 V)										
03x-02A4-2	4,3	-	2,2	-	2,4	3,6	4,2	0,37	0,5	R0
03x-03A5-2	6,1	-	3,5	-	3,5	5,3	6,1	0,55	0,75	R0
03x-04A7-2	7,6	-	4,2	-	4,7	7,1	8,2	0,75	1	R1
03x-06A7-2	12	-	6,1	-	6,7	10,1	11,7	1,1	1,5	R1
03x-07A5-2	12	-	6,9	-	7,5	11,3	13,1	1,5	2	R1
03x-09A8-2	14	-	9,2	-	9,8	14,7	17,2	2,2	3	R2
03x-13A3-2	22	-	13	-	13,3	20,0	23,3	3	3	R2
03x-17A6-2	25	-	14	-	17,6	26,4	30,8	4	5	R2
03x-24A4-2	41	-	21	-	24,4	36,6	42,7	5,5	7,5	R3
03x-31A0-2	50	-	26	-	31	46,5	54,3	7,5	10	R4
03x-46A2-2	69	-	41	-	46,2	69,3	80,9	11,0	15	R4

Figura 2.5: Especificaciones de Variadores de frecuencia línea ABB. [1].

de polos de 1, y una velocidad nominal de 3600 rpm. Al variar la frecuencia, la velocidad de la bomba cambiará de acuerdo con la relación directa entre la frecuencia y el número de polos de la bomba. Podemos observar la variación de velocidad a partir de los siguientes cálculos [17]:

$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (2.2)$$

Donde:

n: velocidad de la bomba

f: frecuencia

p: número de polos

Por ejemplo si consideramos una frecuencia de 45Hz y que la bomba tiene un polo, comprobaremos a que velocidad están trabajando las bombas de agua con la ecuación 2.2:

$$n = \frac{60 * 45}{1}$$

$$n = 2700rpm$$

■ Protecciones eléctricas

Dado que el variador de frecuencia tiene una potencia de 0.372 kW (1/2 HP) y una conexión trifásica de 220VAC con una corriente de entrada de 4.3A a 60Hz, podemos calcular la protección necesaria [1]:

$$I_p = 1,25 * I_{variador} \quad (2.3)$$

Al sustituir los valores en la ecuación 2.3:

$$I_p = 1,25 * 4,3A$$

$$I_p = 5,375A$$

Para seleccionar la correcta protección trifásica para el variador se considero rangos estándares comerciales, en este caso de 10-16A. Finalmente para seleccionar el breaker general de nuestro banco experimental se considera la suma de todas las cargas [7].

$$B_P = FuenteAlimentación + PLC + Variador_1 + Variador_2 \quad (2.4)$$

Se reemplazan valores:

$$B_P = 1,6A + 0,003A + 5,375A + 5,375A$$

$$B_P = 12,353A$$

Por lo tanto, la protección principal del banco experimental con un valor comercial de corriente es:

$$B_P = 16A$$

■ Conductores eléctricos

Para realizar las instalaciones eléctricas del sistema de control y fuerza se utilizó los conductores que poseen las siguientes características:

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas del conductor eléctrico usado para el sistema de control [10].

Conductor No. 14 AWG THHN flexible	
Marca:	Procables
Diametro del cobre:	2.41 mm
Resistencia a 20°C:	8.46 Ohm/Km
Capacidad de corriente:	25 A
Tension Nominal:	600 V
Temperatura de operación:	90°C
Certificación de producto:	RETIE y NTC
Normas:	UL 83, NTC 1332

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas del conductor eléctrico usado para el sistema de fuerza [10].

Conductor No. 12 AWG THHN flexible	
Marca:	Procables
Diametro del cobre:	2.91 mm
Resistencia a 20°C:	5.31 Ohm/Km
Capacidad de corriente:	30 A
Tension Nominal:	600 V
Temperatura de operación:	90°C
Certificación de producto:	RETIE y NTC
Normas:	UL 83, NTC 1332

2.1.3. Costo de componentes

Todos los componentes que fueron necesarios para elaborar el banco experimental se presentan en la Tabla 2.5. La Coordinación de Laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca se encargó de cubrir los aspectos del ítem 1-18, los cuales abarcan los equipos eléctricos y electrónicos del laboratorio, así como la estructura del banco.

Tabla 2.5: Costo de materiales implementados en banco experimental.

Lista de componentes del banco experimental				
Item	Descripción	Cantidad	P.Unitario	P.total
1	Lámpara piloto 24V	6	\$3,00	\$18,00
2	Pulsante	4	\$4,00	\$16,00
3	Bloque de contacto NO	4	\$2,00	\$8,00
4	Bloque de contacto NC	4	\$2,00	\$8,00
5	Conector banana hembra	114	\$7,90	\$900,60
6	Selector 2 posiciones (ON/OFF)	2	\$6,80	\$13,60
7	Selector 3 posiciones	1	\$10,14	\$10,14
8	Selector Trifásico	1	\$12,65	\$12,65
9	Switch ojo de cangejo	8	\$1,15	\$9,20
10	Contactador con bobina 24V	2	\$22,00	\$44,00
11	Breaker 3 polos 16A	1	\$20,00	\$20,00
12	Breaker 2 polos 10A	1	\$13,16	\$13,16
13	Breaker monofásico 6A	1	\$8,00	\$8,00
14	Breaker monofásico 2A	1	\$7,40	\$7,40
15	Fuente 24V	1	\$60,00	\$60,00
16	Variadores de frecuencia linea ABB	2	\$703,68	\$1.407,36
17	PLC Logo v8	1	\$250,00	\$250,00
18	Porta Led	12	\$6,00	\$72,00
19	Bomba de agua 1/2Hp	2	\$75,00	\$150,00
20	Rebobinado bombas	2	\$75,00	\$150,00
21	Sensor de presión 0-1MPa	1	\$35,00	\$35,00
22	Codo 1"	7	\$0,60	\$4,20
23	Unión 1"	4	\$0,80	\$3,20
24	Tubo enroscable de 1"	1	\$26,14	\$26,14
			Total	\$3.246,65

2.2. Programación y configuración de equipos

2.2.1. Programación del PLC

Los PLC's en la actualidad son uno de los equipos más importantes para efectuar proyectos de automatización en sectores industriales, comerciales y residenciales. Mencionados sectores suelen necesitar controlar diferentes máquinas las cuales deben funcionar siguiendo un conjunto de órdenes. Las órdenes que el usuario necesita que las máquinas interpreten, deben ser programadas a través de un software para luego ser cargadas en el controlador lógico programable [29].



Figura 2.6: PLC S7-1500 [2].

El PLC que controla el sistema de presión constante es del S7-1500 de la marca Siemens del modelo CPU 1516-3 PN/DP, por lo tanto, el software utilizado para la programación es el TIA Portal (Portal de Automatización Totalmente Integrado), el cual incorpora una amplia variedad de funciones útiles para la automatización [29]. Para ello se asignó las entradas del PLC para garantiza un control preciso y eficiente, contribuyendo al rendimiento óptimo del sistema en términos de presión constante.

Tabla 2.6: Asignación de entradas digitales al PLC.

Entradas Digitales	Identificador	Función	Tipo de Contacto
I16.0	SEM1	Pulsante De Emergencia Bomba 1	NC
I16.1	SEM2	Pulsante De Emergencia Bomba 2	NC
I16.2	SB1	Habilita Bomba 1	NO
I16.3	SB2	Habilita Bomba 2	NO
I16.4	S1	Selección Modo Automatico	NO
I16.5	S2	Selección Modo Manual	NO

Asi mismo se asigno las salidas digitales para el control de los variadores de frecuencia y la señalización de funcionamiento de las bombas y posible falla mediante las lámparas piloto.

Tabla 2.7: Asignación de salidas digitales al PLC.

Salidas Digitales	Identificador	Función	Tipo de Contacto
Q8.0	H1	Enciende Variador 1 Y Lámpara Piloto Verde	NO
Q8.1	H2	Enciende Variador 2 Y Lámpara Piloto Verde	NO
Q8.2	H3	Enciende Falla Bomba 1 (Lámpara Piloto Rojo)	NO
Q8.3	H4	Enciende Falla Bomba 2 (Lámpara Piloto Rojo)	NO

El S7-1500 fue empleado para gestionar diversas funciones, ya que cuenta con módulos completos de entradas y salidas analógicas, como el modelo 6ES7531-7KF00-0AB0 para la entrada y el 6ES7532-5HD00-0AB0 para la salida, necesarios para detectar señales del sensor de presión.

Ref.:	6ES7531-7KF00-0AB0	6ES7531-7NF10-0AB0
Descripción breve	AI 8xU/RTD/TC ST	AI 8xU/ HS
Número de entradas	8	8
Resolución	16 bits incl. signo	16 bits incl. signo
Tipo de medición	Tensión Intensidad Resistencia Termorresistencia Termopar	Tensión Intensidad
Aislamiento galvánico entre los canales	No	No
Tensión nominal de alimentación	24 V DC	24 V DC
Diferencia de potencial admisible entre las entradas (UCM)	10 V DC	10 V DC
Alarma de diagnóstico	Sí, límite superior e inferior respectivamente	Sí, límite superior e inferior respectivamente
Alarma de proceso	Sí	Sí
Modo isócrono soportado	No	Sí
Tiempo de conversión (por canal)	9/23/27/107 ms	125 μ s, por módulo, con independencia del número de canales activados

Figura 2.7: Módulo de entradas analógicas para PLC S7-1500 [2].

Ref.:	6ES7532-5HD00-0AB0	6ES7532-5HF00-0AB0
Descripción breve	AQ 4xU/ ST	AQ 8xU/ HS
Número de salidas	4	8
Resolución	16 bits incl. signo	16 bits incl. signo
Tipo de salida	Tensión Intensidad	Tensión Intensidad
Aislamiento galvánico entre los canales	No	No
Tensión nominal de alimentación	24 V DC	24 V DC
Alarma de diagnóstico	Sí	Sí
Modo isócrono soportado	No	Sí

Figura 2.8: Módulo de salidas analógicas para PLC S7-1500 [2].

El lenguaje Ladder fue usado para la programación del PLC. En la siguiente imagen se puede observar el programa creado para que el sistema de presión constante pueda funcionar de acuerdo a con los requerimientos necesarios.

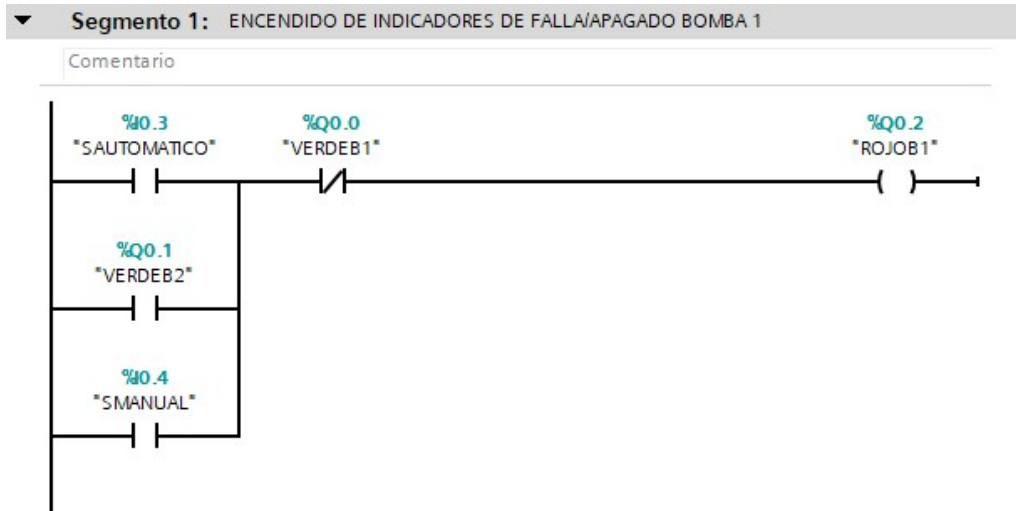


Figura 2.9: Línea de programación del segmento 1 realizado en TIA Portal.

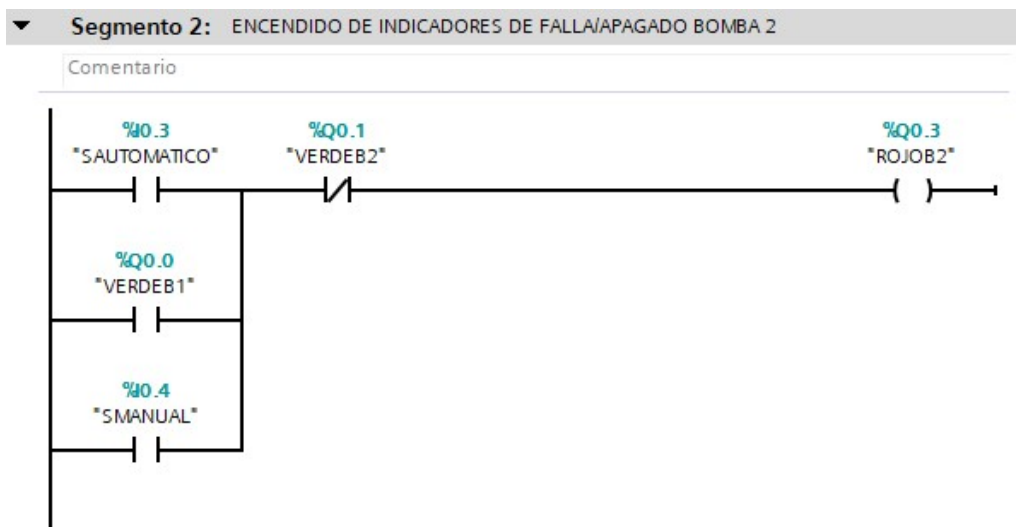


Figura 2.10: Línea de programación del segmento 2 realizado en TIA Portal.

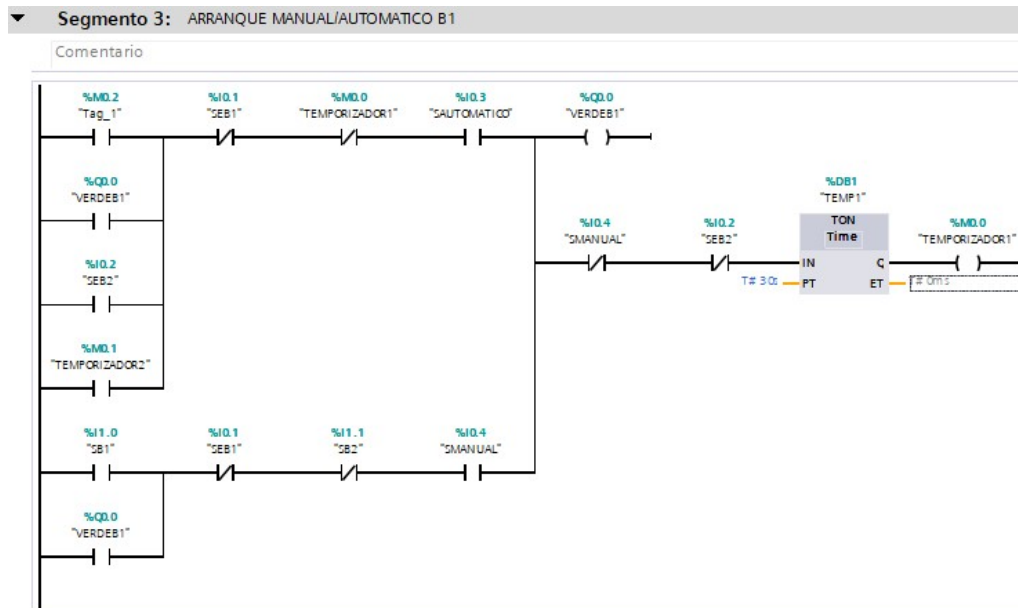


Figura 2.11: Línea de programación del segmento 3 realizado en TIA Portal.

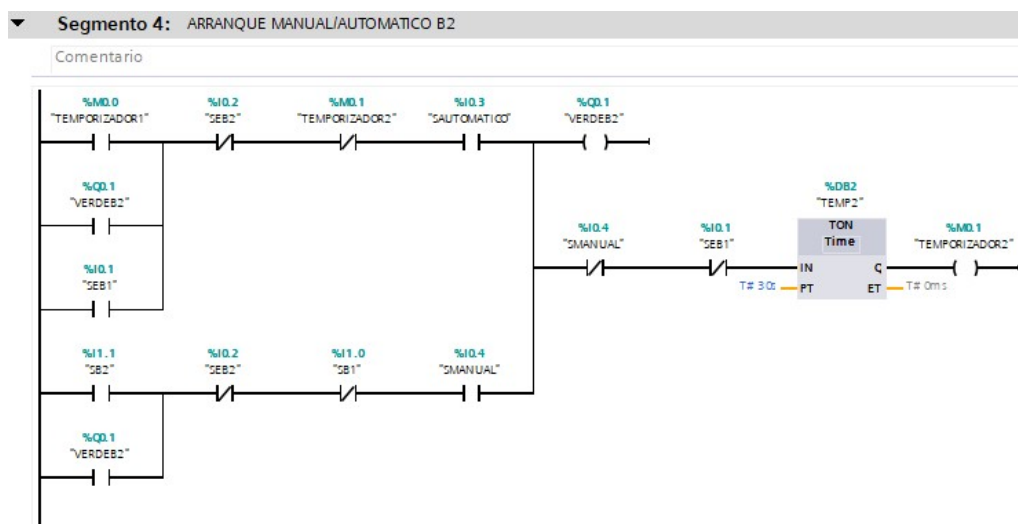


Figura 2.12: Línea de programación del segmento 4 realizado en TIA Portal.

2.2.2. Configuración del VDF

En la Figura 2.13 podemos observar el diagrama de una visión general del variador de frecuencia, de las cuales se hará uso de la entrada analógica 1 para el control de la velocidad de las bombas a partir de la retroalimentación realizada por el sensor de presión instalado en el sistema hidráulico, además de las entradas digitales que enviadas desde el PLC.

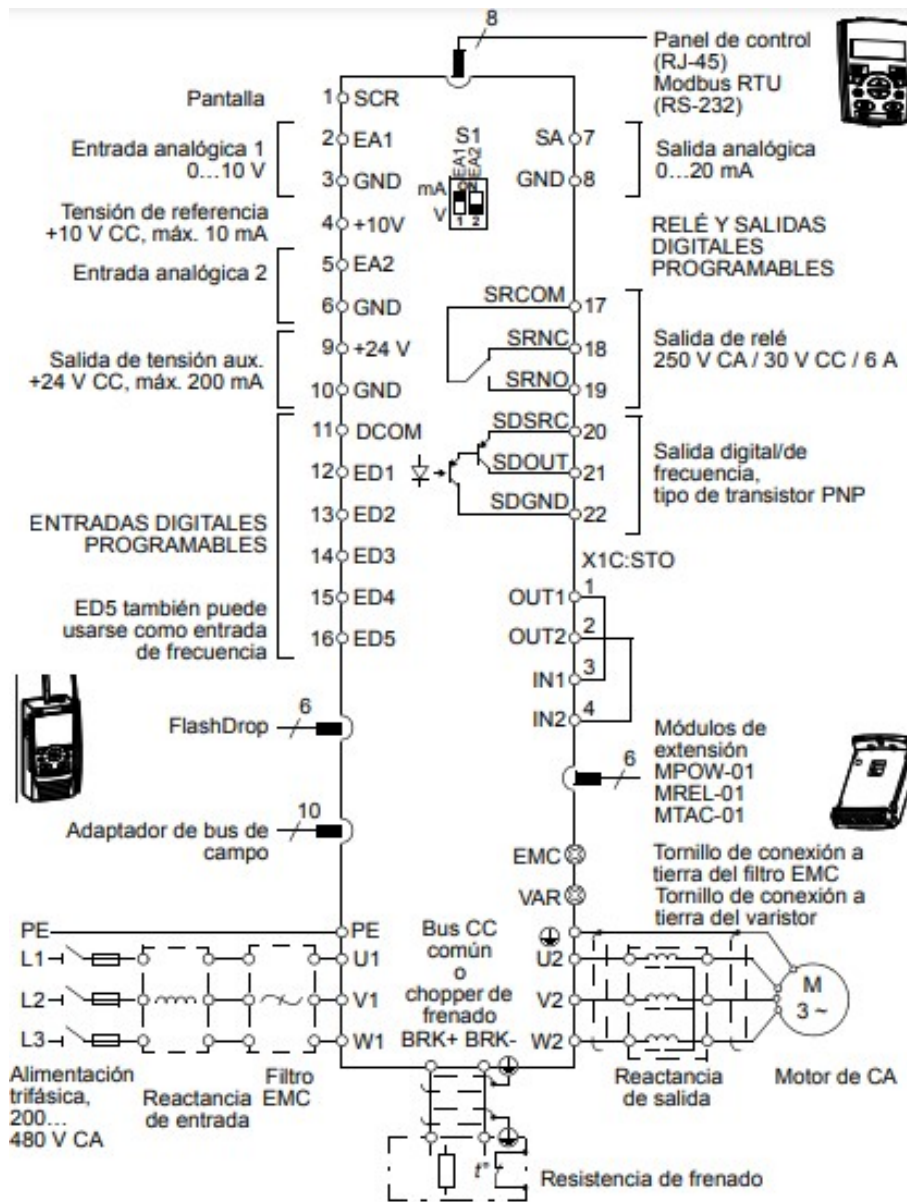


Figura 2.13: Pines para conexión de variador de frecuencia ABB ACS355 [1].

En la configuración de la macro PID es necesario de los diferentes códigos de programación los cuales se obtiene del manual del variador ABB ACS355. Los códigos que se utilizaron para configurar los VFD son los siguientes:

Tabla 2.8: Configuración de parámetros del VFD.

DETALLE	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO
DATOS DE PARTIDA: 99	99.01	Idioma	Español
	99.02	Macro de aplicación	Control PID
	99.04	Modo de control motor	Vector velocidad
	99.05	Voltaje nominal motor	220 V
	99.06	Corriente nominal motor	1.5 A
	99.07	Frecuencia nominal motor	60 Hz
	99.08	Velocidad nominal motor	3450 RPM
	99.09	Potencia nominal motor	0.4 Hp
MARCHA/ PARO/ DIR: 10	10.01	Comando EXT1	Sin selec.
	10.02	Comando EXT2	ED1
	10.03	Dirección	Avance
SELEC. REFERENCIA: 11	11.01	Comando EXT1	REF (RPM/Hz)
	11.02	Comando EXT2	EXT2
	11.03	Dirección	EA2
	11.04	Ref. EXT1 mínimo	0 %
	11.05	Ref. EXT2 máximo	100 %
VELOCIDAD CONSTANTE: 12	12.01	Selec. Velocidad constante	Sin selec.
ENTRADAS ANALÓGICAS: 13	13.01	Mínimo EA1	20 %
	13.02	Máximo EA1	100 %
	13.03	Mínimo EA2	20 %
	13.04	Máximo EA2	100 %
CONTROLES DE SISTEMA: 16	16.01	Permiso de marcha	Sin selec.

LIMITES: 20	20.01	Velocidad mínima	1100 RPM
	20.02	Velocidad máxima	3300 RPM
	20.03	Corriente máxima	1.5 A
	20.05	Control Sobrecorriente	Si
	20.06	Control Sobrevoltaje	Si
	20.07	Frecuencia mínima	0 Hz
	20.08	Frecuencia máxima	60 Hz
	MARCHA/ PARO: 21	21.01	Función de marcha
21.02		Función de paro	Rampa
ACEL/DESACEL: 22	22.01	Selec. Aceleración/ Desaceleración.	Sin Selec.
	22.02	Tiempo Aceleración	1 seg
	22.03	Tiempo Desaceleración	1 seg
	22.04	Tipo de rampa	Lineal
PANTALLA PANEL: 34	34.19	Unidad de salida	PSI
PROCESO PID: 40	40.01	Ganancia	1
	40.02	Tiempo de integración	1 seg
	40.03	Tiempo de derivación	0 seg
	40.05	Valor de error	No
	40.06	Unidades	PSI
	40.08	Valor mínimo	0
	40.09	Valor máximo	60
	40.10	Punto de consigna	Interno
	40.11	Punto de consigna interno	32

PROCESO PID: 40	40.16	Entrada ACT1	EA1
	40.18	Valor mínimo ACT1	0 %
	40.19	Valor máximo ACT1	100 %
	40.22	Selec. Dormir	Interno
	40.23	Nivel para dormir PID	1100 RPM
	40.24	Demora para dormir PID	5 seg
	40.25	Nivel para despertar PID	0.5 %
	40.26	Demora para despertar PID	0.5 seg

Los parámetros del **PID** como es la ganancia (4001), el tiempo de integración (4002) y derivación (4003). También es imprescindible ajustar la función dormir (4023-4024) en el variador de frecuencia cuando la bomba opera a velocidades bajas. En este punto, la función encuentra el giro pausado y frena el bombeo innecesario al sistema hidráulico. Posteriormente, al detectar una disminución en la presión del sistema, activa la función despertar (4025-4026), incrementando gradualmente la velocidad de la bomba hasta alcanzar un nivel necesario. Estas operaciones reflejan el correcto funcionamiento del sistema de presión constante.

2.3. Fase de implementación

Esta fase se enfoca en detallar las instalaciones y procesos que se llevaron a cabo para que el banco experimental pueda funcionar de manera adecuada. El propósito principal es permitir que los diversos módulos integrados faciliten de manera educativa el manejo del sistema a una presión constante. Asimismo, se buscó que este banco sea una valiosa herramienta para realizar diversas prácticas que contribuyan al aprendizaje.

2.3.1. Requerimientos del sistema de presión constante

Algunos de los requerimientos que se tuvieron en cuenta para la respectiva evaluación del ahorro energético y desempeño del sistema de presión constante con dos bombas son [7]:

- Garantizar una presión constante en el sistema en cualquier instante, teniendo en cuenta una operación manual-automática de las bombas de forma individual.
- Los variadores de frecuencia adaptan la velocidad de las bombas según la presión que se necesita en la salida del sistema.
- Las bombas de agua operarán a intervalos programados, considerando un posible mantenimiento de una de ellas.
- La retroalimentación del sistema se llevará a cabo mediante el uso del sensor de presión.
- En caso de falla, el sistema se apagará.

2.3.2. Construcción del banco experimental

La construcción partió del diseño de los acrílicos, los cuales van instalados en el banco experimental con el fin de sujetar cada equipo necesario para el funcionamiento del sistema. Además, en los acrílicos se colocó el nombre de cada elemento, datos específicos y simbologías para que los usuarios tengan la información necesaria para el correcto uso.

A continuación se presenta los planos realizados en AutoCAD, los mismos que fueron entregados a una empresa especializada en trabajos de corte y grabado láser para la correspondiente elaboración. En los Anexos A.1 y A.2 se puede apreciar con mayor facilidad cada detalle de los planos.

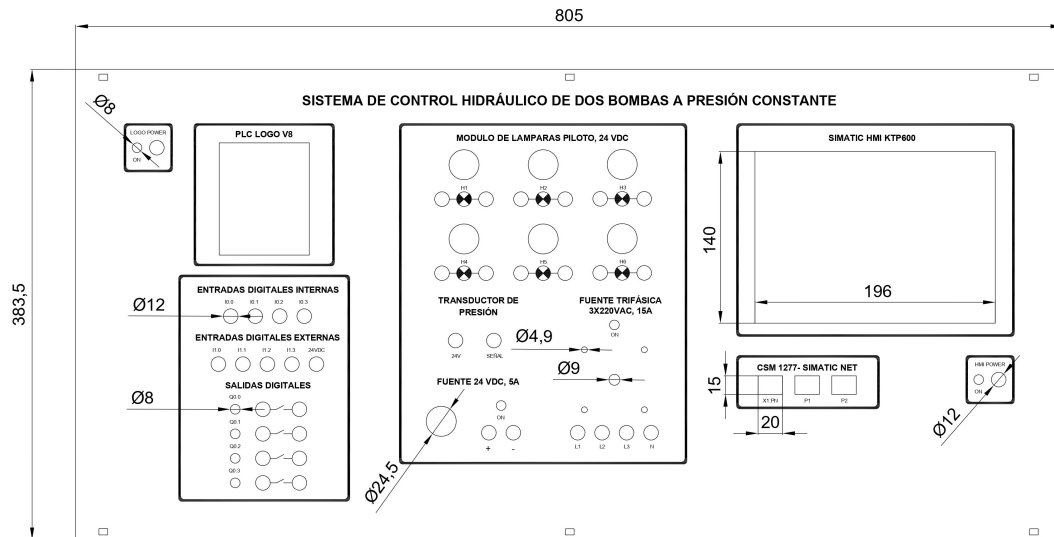


Figura 2.14: Plano del acrílico ubicado en la parte superior del banco experimental.

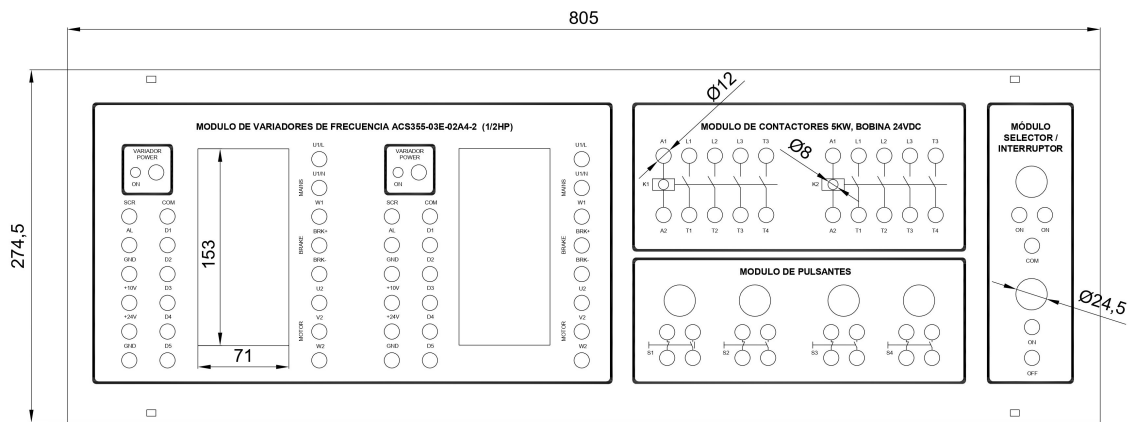


Figura 2.15: Plano del acrílico ubicado en la parte central del banco experimental.



Figura 2.16: Diseño 3D del acrílico ubicado en la parte superior del banco experimental.

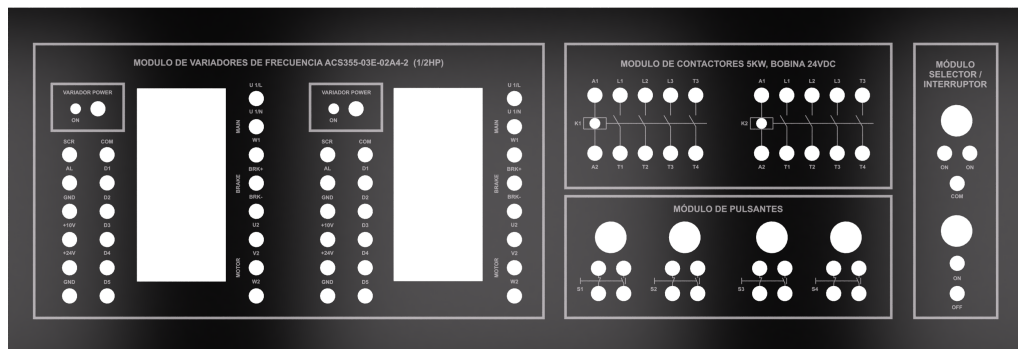


Figura 2.17: Diseño 3D del acrílico ubicado en la parte central del banco experimental.

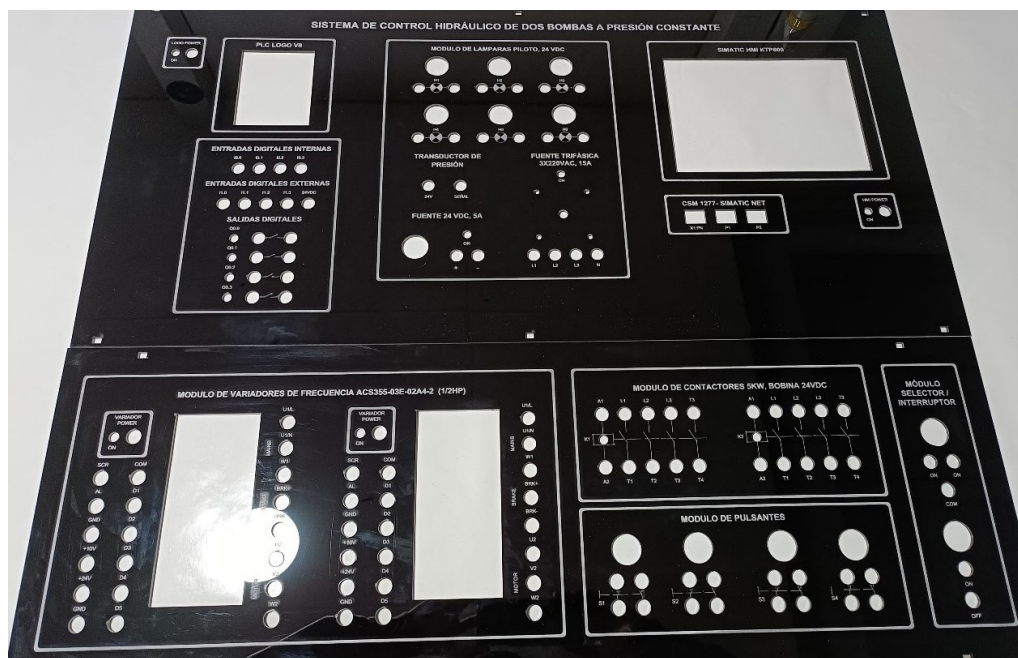


Figura 2.18: Acrílico superior y central cortados y grabados con láser.

Al seleccionar los diversos equipos necesarios, se ubicó cada uno de ellos en función de su tarea específica y teniendo en cuenta el diseño 3D del sistema de control hidráulico de dos bombas a presión constante, previamente definido.

- En la parte superior del banco como se aprecia en la figura 2.19, se encuentran equipos de programación como el PLC Logo y HMI (Interfaz Hombre - Maquina), así como la alimentación trifásica a 220VAC, la alimentación de 24VDC y el modulo de luces indicadoras (lámparas piloto).

La interfaz Hombre - Maquina se consideró en el diseño para ser colocado posteriormente, por el motivo que coordinación de laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, no cuentan con uno disponible para poder ser utilizado. La instalación y programación del HMI para controlar el sistema de presión constante puede ser valido como un proyecto para los estudiantes.



Figura 2.19: 3D del acrílico ubicado en la parte superior con sus correspondientes equipos.

- En la parte central del banco como se visualiza en la figura 2.20, se observan los elementos destinados al control de las bombas de agua, tales como variadores de frecuencia, pulsantes, contactores y selectores.

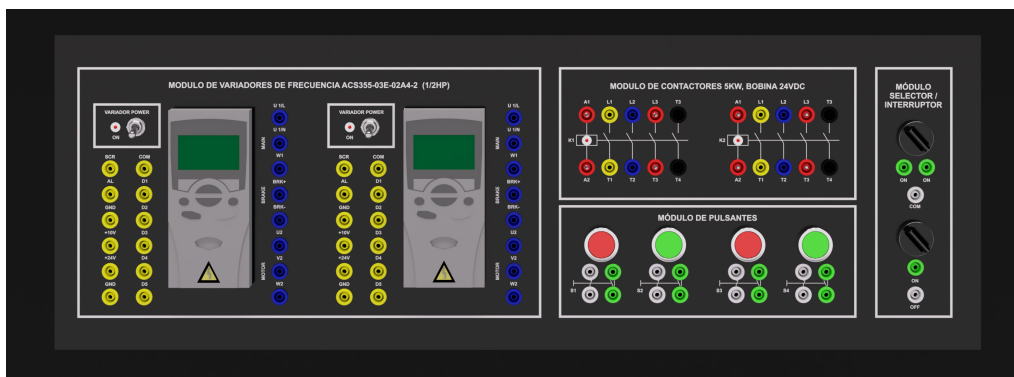


Figura 2.20: 3D del acrílico ubicado en la parte central con sus correspondientes equipos.



Figura 2.21: Acrílicos colocados en el banco con sus respectivos equipos.

2.3.2.1. Cableado del sistema de control

Después de haber definido las funciones de entradas y salidas en el PLC durante la fase de diseño de hardware, se procedió a realizar el esquema para gestionar el control del sistema.

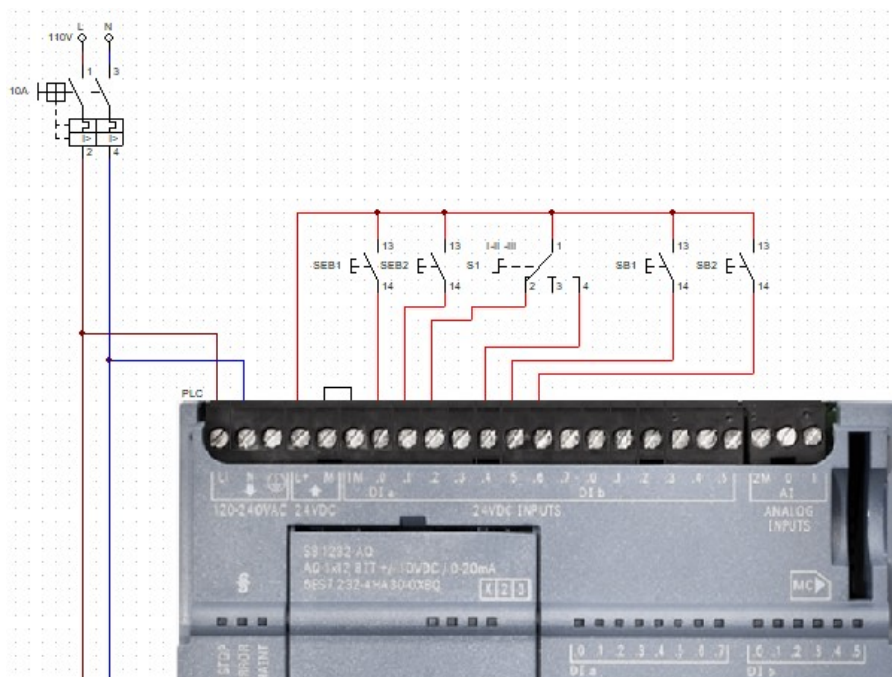


Figura 2.22: Diagrama de conexión de entradas digitales al controlador lógico programable.

En la figura 2.23 se puede observar la distribución de salidas digitales y analógicas conectadas en el Controlador Lógico Programable.

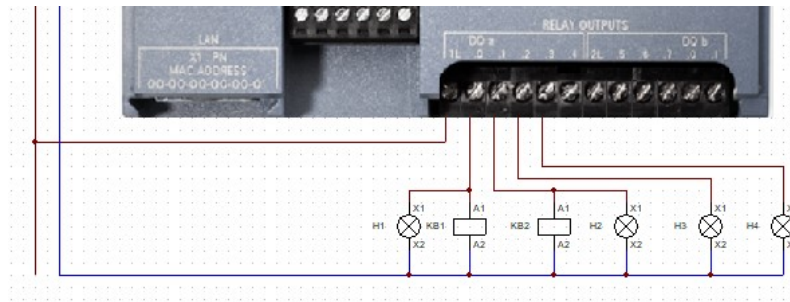


Figura 2.23: Diagrama de conexión de salidas digitales y analógicas al controlador lógico programable.

2.3.2.2. Cableado del sistema de fuerza

El sistema de presión constante cabe destacar la posibilidad de conectarse de dos formas distintas, proporcionando así flexibilidad en la configuración del circuito:

- En la Figura 2.24, la primera conexión que se observa presenta el sistema de fuerza a presión constante, equipado con dos variadores para el control de las dos bombas. Este sistema incluye un interruptor de protección, variadores de frecuencia y protecciones para las respectivas bombas de agua, cada una con una potencia de 1/2 HP.

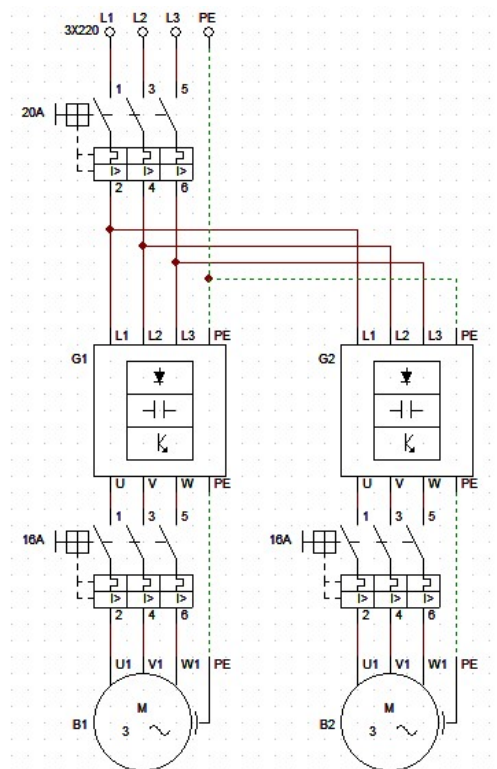


Figura 2.24: Diagrama de fuerza del diagrama a presión constante.

- En la Figura 2.25, la primera conexión que se observa presenta el sistema de fuerza a presión constante, equipado con un variador para el control de las dos bombas. Este sistema incluye un interruptor de protección, variador de frecuencia, contactores y protecciones para las respectivas bombas de agua, cada una con una potencia de 1/2 HP.

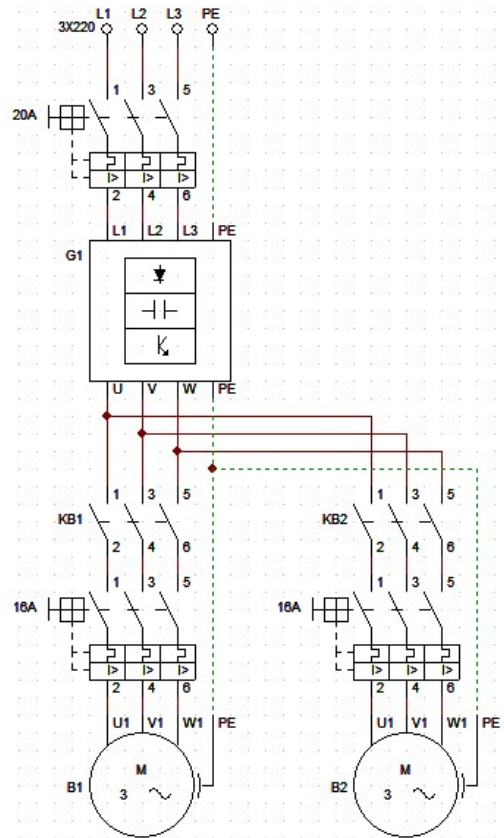


Figura 2.25: Diagrama de fuerza del diagrama a presión constante.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis de Consumo Energético

Se determinó el consumo energético del sistema a presión constante, tanto en el arranque directo como al implementar el variador de frecuencia, se realizó diferentes pruebas de corriente y voltaje con el fin de calcular la potencia activa:

Tabla 3.1: Datos del sistema en arranque directo.

PSI	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Velocidad [rpm]
12	214,6	0,66	130,3051	3300
15	214,45	0,72	142,0516	3300
20	214,36	0,78	153,8247	3300
25	214,52	0,85	167,7546	3300
30	214,45	0,94	185,4563	3300
35	214,3	1,02	201,0991	3300
40	214,32	1,11	218,8635	3300
45	214,36	1,22	240,5976	3300
50	214,34	1,3	256,3506	3300
55	214,25	1,42	279,8962	3298
60	214,2	1,55	305,4492	3260
PROMEDIO	214,3772	1,0518	207,4470	

Tabla 3.2: Datos del sistema con variador de frecuencia.

PSI	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Velocidad [rpm]
12	225	0,58	120,06	3303
15	224	0,67	138,0736	3300
20	223	0,73	149,7668	3292
25	223,85	0,79	162,6941	3290
30	219,6	0,85	171,7272	3152
35	215	0,95	187,91	2770
40	207	1	190,44	2500
45	203	1,05	196,098	1110
PROMEDIO	217,5562	0,8275	165,6255	

Para calcular la potencia reactiva del sistema es necesario aplicar la Ley de Watt y adicionalmente se considera un factor de potencia de 0,92:

$$P = V * I * \cos(\phi) \quad (3.1)$$

- Potencia del sistema en arranque directo:

$$P_1 = 214,3772 * 1,0518 * 0,92$$

$$P_1 = 0,2074kW$$

- Potencia de sistema con variador de frecuencia:

$$P_2 = 217,5562 * 0,8275 * 0,92$$

$$P_2 = 0,1656kW$$

Se determinó el consumo energético tanto en el arranque directo como del sistema con variador de frecuencia, considerando un total de 12 horas diarias de operación, distribuidas equitativamente con 6 horas para la bomba 1 y 6 horas para la bomba 2.

$$\text{Consumoenergético} = \text{Potencia} * \text{Tiempodeoperación} \quad (3.2)$$

- Consumo energético del sistema en arranque directo:

$$\text{Consumo}_{diario} = 0,2074kW * 12h = 2,4893kWh$$

$$Consumo_{semanal} = 2,4893kWh * 7días = 17,4255kWh$$

$$Consumo_{mensual} = 17,4255kWh * 4semanas = 69,7022kWh$$

$$Consumo_{anual} = 69,7022kWh * 12meses = 836,4264kWh$$

- Consumo energético del sistema con variador de frecuencia:

$$Consumo_{diario} = 0,1656kW * 12h = 1,9875kWh$$

$$Consumo_{semanal} = 1,9875kWh * 7días = 13,9125kWh$$

$$Consumo_{mensual} = 13,9125kWh * 4semanas = 55,6502kWh$$

$$Consumo_{anual} = 55,6502kWh * 12meses = 667,8023kWh$$

Para determinar el gasto anual que genera el sistema haremos referencia el costo de energía (kWh) del Ecuador de acuerdo a la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables es de 9.6 ctvs.

- Gasto del sistema en arranque directo:

$$Gasto_{diario} = 2,4893kWh * \$0,096 = \$0,2389$$

$$Gasto_{semanal} = 17,4255kWh * \$0,096 = \$1,6728$$

$$Gasto_{mensual} = 69,7022kWh * \$0,096 = \$6,6914$$

$$Gasto_{anual} = 836,4264kWh * \$0,096 = \$80,2969$$

- Gasto del sistema con variador de frecuencia:

$$Gasto_{diario} = 1,9875kWh * \$0,096 = \$0,1908$$

$$Gasto_{semanal} = 13,9125kWh * \$0,096 = \$1,3356$$

$$Gasto_{mensual} = 55,6502kWh * \$0,096 = \$5,3424$$

$$Gasto_{anual} = 667,8023kWh * \$0,096 = \$64,1090$$

El gasto anual en el sistema de arranque directo es de \$80.2969, mientras que en el sistema con variador de frecuencia el gasto disminuye a \$64.1090. Por lo tanto, se obtiene un ahorro del 20.16 %.

Adicionalmente en el sistema con variadores de frecuencia se realizó el análisis de potencia con el dispositivo de calidad de energía de la marca FLUKE 1735 con el fin de obtener datos más precisos del consumo energético como se puede observar en el anexo [B](#).

3.2. Análisis de funcionamiento del banco experimental

Después de llevar a cabo el análisis del consumo energético en el banco experimental, utilizando un sistema de control hidráulico con dos bombas a presión constante, se procedió a realizar un análisis detallado del funcionamiento y de los inconvenientes presentados.

1. En la alimentación eléctrica del banco se tuvo una lectura de entrada de 210VAC por lo cual no se tendría ningún inconveniente en el funcionamiento de los equipos, por el motivo que cumple con el rango establecido por los fabricantes de cada elemento utilizado en el proyecto.
2. El sentido de giro horario establecido por el fabricante es de suma importancia porque la bomba debe realizar su trabajo de absorber e impulsar el agua en el sistema hidráulico.
3. En el control manual, el operario elige qué bomba activar mediante la manipulación de los pulsadores de entrada al [PLC](#), mientras que el variador de frecuencia se encarga del control de la presión en el sistema, cabe mencionar que la velocidad máxima configurada para las bombas es de 3300 RPM.

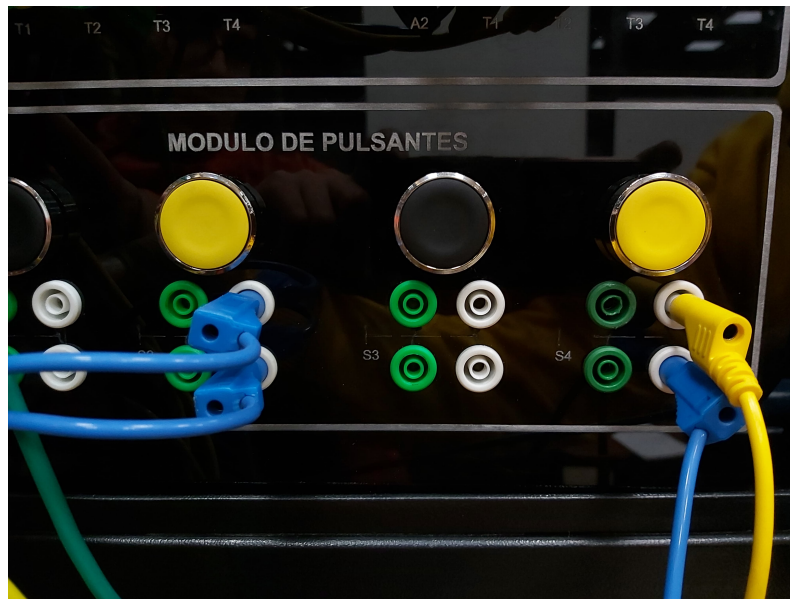


Figura 3.1: Pulsadores para control manual de la bomba 1 y 2.



Figura 3.2: Velocidad máxima configurada para las bombas de agua.

4. En el control automático, por otro lado, el operario inicia la bomba al seleccionar el modo automático a través del selector de 3 posiciones. Internamente, el PLC se encarga de poner en funcionamiento las bombas después del tiempo establecido por el operador en el programa. Si es necesario detener una de las bombas para mantenimiento, se presiona el pulsador de emergencia, lo que activa la otra bomba de agua disponible.

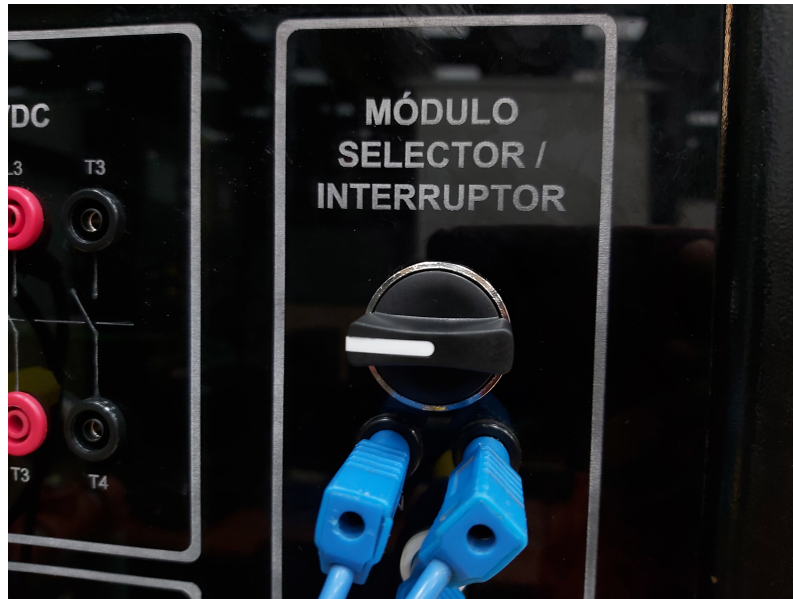


Figura 3.3: Selector para el funcionamiento automático de las bombas de agua.

5. La velocidad de las bombas de agua es proporcional a la demanda; es decir, si hay un bajo consumo en el sistema hidráulico, la bomba de agua funcionará a baja velocidad. A medida que aumente el consumo en el sistema, la bomba de agua incrementará su velocidad. En caso de no haber consumo en el sistema, el variador de frecuencia pondrá la bomba de agua en reposo, apagándola hasta que se requiera su funcionamiento nuevamente, para lo cual el [VFD](#) hace uso de la función dormir configurada previamente, en donde al presentarse una rango igual o menor a 1100 RPM, la función mencionada entra en acción.
6. En control manual o automático, si la bomba 1 está activa, la bomba 2 debe estar detenida. De la misma manera si la bomba 2 está activada, la bomba 1 debe permanecer en reposo hasta que el operario decida alternar el funcionamiento, o si la selección se encuentra de forma automática, la bomba 1 deberá entrar en acción cuando el tiempo programado en el [PLC](#) se haya cumplido.



Figura 3.4: Función dormir activada.



Figura 3.5: Bomba 2 activada y bomba 1 en reposo.



Figura 3.6: Bomba 1 activada y bomba 2 en reposo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se cumplió con éxito el objetivo principal de diseñar y construir un sistema automatizado para controlar el bombeo de agua a presión constante, el mismo que sirve como plataforma de estudio para los estudiantes de la Universidad Politécnica salesiana de Cuenca.

El dimensionamiento de los **VFD** fue el adecuado, por lo tanto, se concluye que los variadores de frecuencia ABB ACS355-03E-02A4-2 Son capaces de controlar las bombas de agua Pedrollo de 0.5 HP.

Al observar las capacidades del tipo de **VFD** seleccionado se llegó a la conclusión que las dos bombas de agua pueden ser controladas por un solo variador de frecuencia, para lo cual se debe hacer uso de los contactores CHINT.

Mientras se realizaba la respectiva configuración de los variadores de frecuencia se cambiaron varios parámetros que venían con valores preestablecidos, con lo cual se pudo mirar que un parámetro ingresado de manera incorrecta ocasionará el apareamiento de una o más fallas que pueden ser visualizadas en la pantalla.

Se observó que el variador de frecuencia además de controlar las bombas de agua posee un sistema de vigilancia que permite salvaguardar la integridad de los motores.

Al hacer uso de uno o más **VFD** se obtiene un mayor ahorro energético considerable con respecto a un control ON/OFF. Para el caso presentado se obtuvo un ahorro anual del 21,33 % reflejando de esta manera una disminución en el costo operativo.

La programación ejecutada en el **PLC** cumple con los requerimientos, planteados permitiendo la alternancia de las bombas de agua de forma manual o automática de manera segura para el usuario quien manipule el sistema de presión constante.

Un sistema de abastecimiento de agua debe poseer una confiabilidad alta, por lo cual el uso de un controlador lógico programable es la mejor opción, por el motivo que ofrece eficiencia, confiabilidad y seguridad para los equipos que son controlados.

4.2. Recomendaciones

Se sugiere verificar la compatibilidad entre los variadores de frecuencia y la bombas de agua, por el motivo que una o varias bombas pueden tener distintas cargas, por ende es necesario seleccionar la capacidad adecuada del o los **VFD**'s. Además, es necesario mencionar la importancia de las medidas de seguridad, es decir, hacer uso de un pulsador de emergencia en el caso de un accidente, como también tener en cuenta el adecuado dimensionamiento de los elementos de protección, con lo cual se puede garantizar la integridad de los equipos instalados en la caso de una falla eléctrica.

Se recomienda hacer uso del mismo código de programación presentado previamente para que el banco experimental pueda funcionar de manera apropiada, al igual que mantener la misma configuración ejecutada en los **VFD**'s. En el caso que se requiera cambiar los parámetros de los variadores es necesario tener una lectura previa de los códigos que se encuentran dentro del manual de los **VFD** ABB ACS355.

Se aconseja realizar un mantenimiento preventivo de manera programada a las bombas de agua. El uso continuo o desatención del sistema puede ocasionar un deterioro de las partes que conforman mencionado equipo, como también perder cierto porcentaje en el rendimiento, confiabilidad y eficiencia. Un correcto mantenimiento

garantiza una buena funcionalidad de las bombas, salvaguardando la vida útil de las mismas.

Es recomendable hacer uso de un sistema de presión constante debido al ahorro económico anual que se puede obtener al hacer uso de esta metodología para el abastecimiento de agua potable en departamentos, comercios, hospitales, institutos educativos, etc.

ANEXOS

ANEXO A

Plano de acrílicos

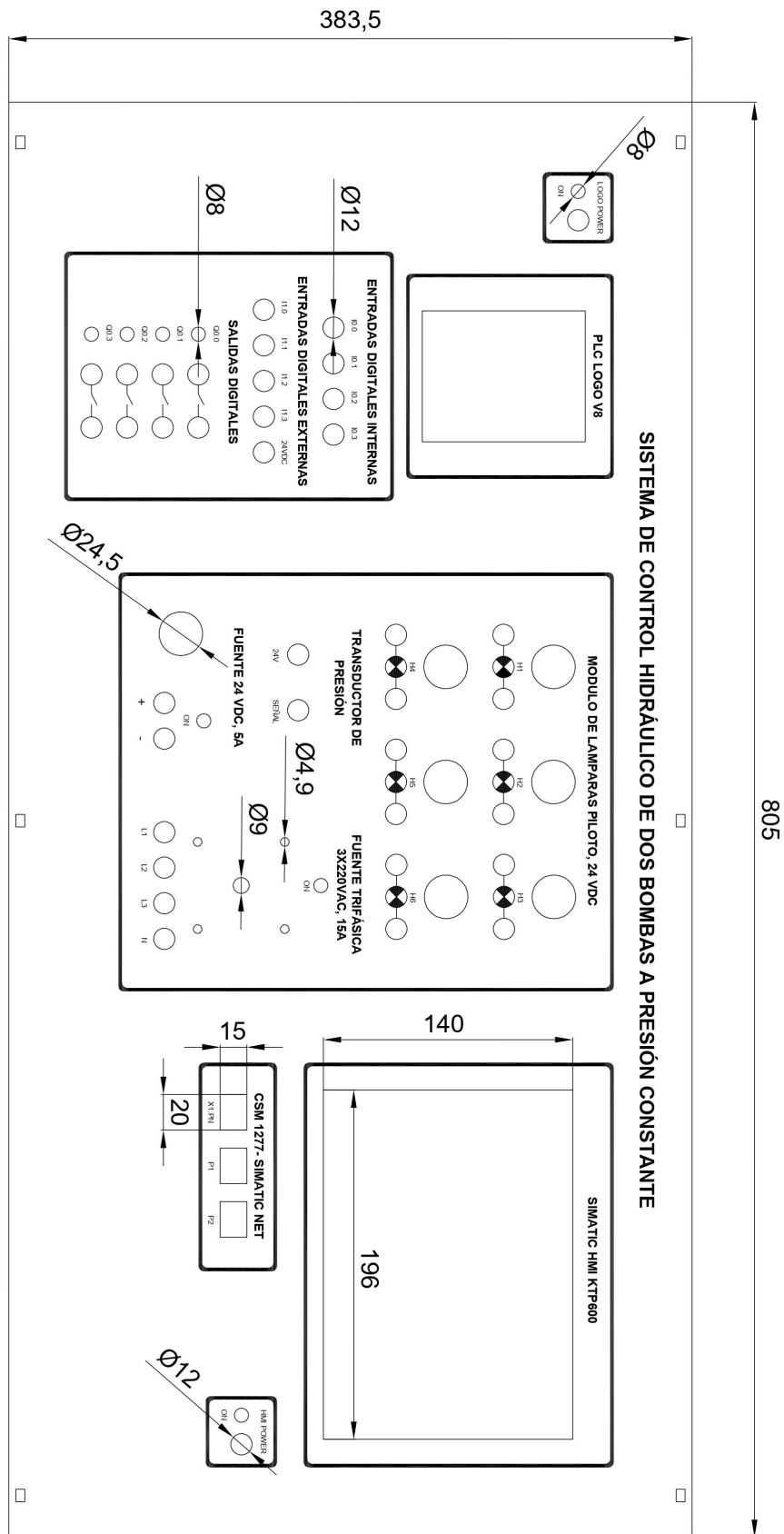


Figura A.1: Plano en milímetros del acrílico superior.

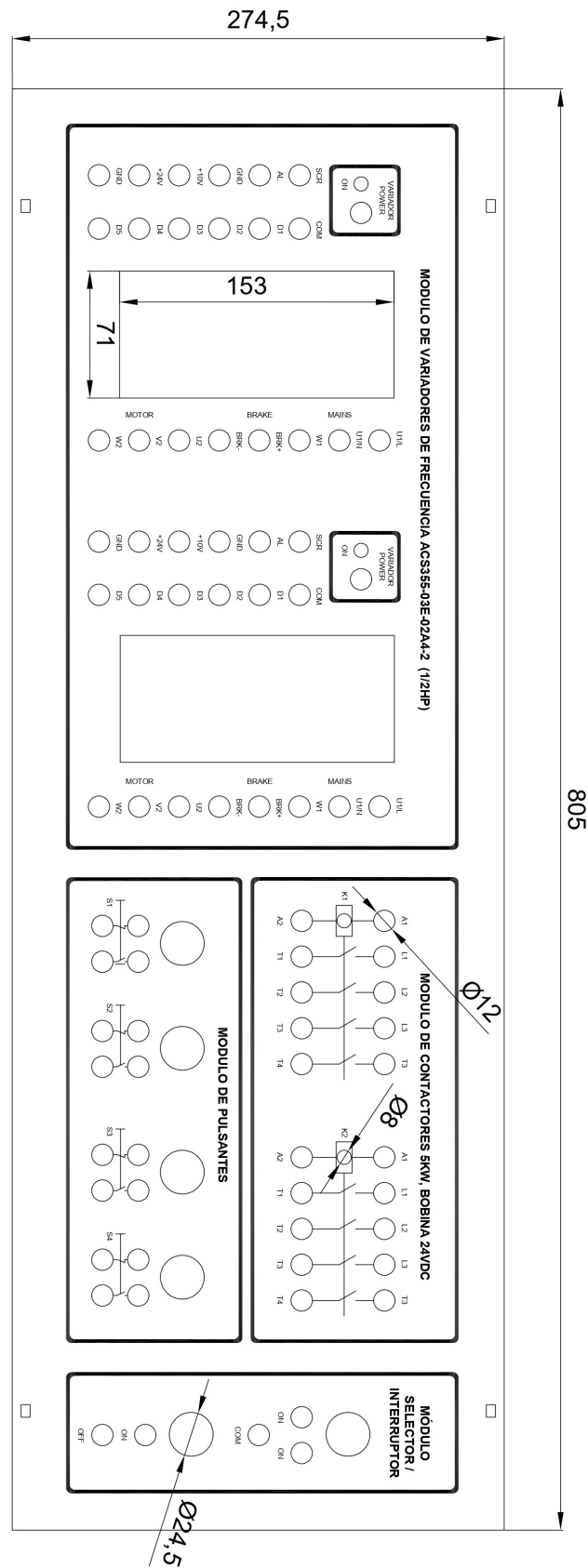


Figura A.2: Plano en milímetros del acrílico central.

ANEXO B

Mediciones con el Fluke 1735

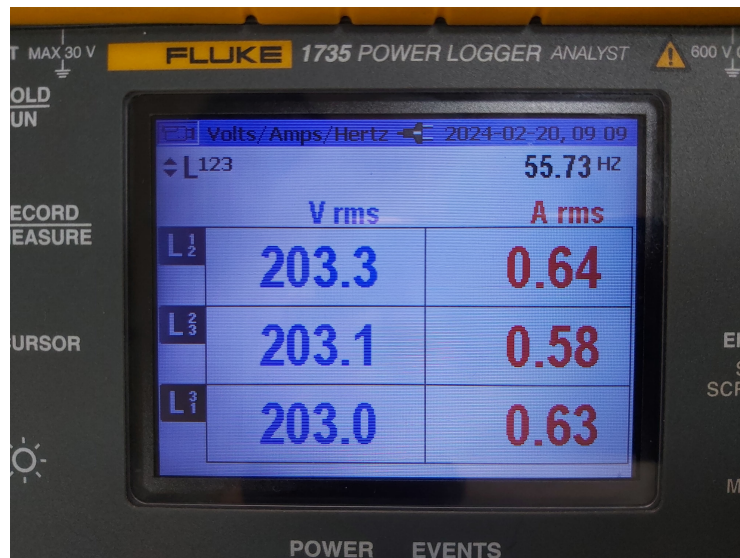


Figura B.1: Medición de voltaje y corriente L-L con Fluke 1735.

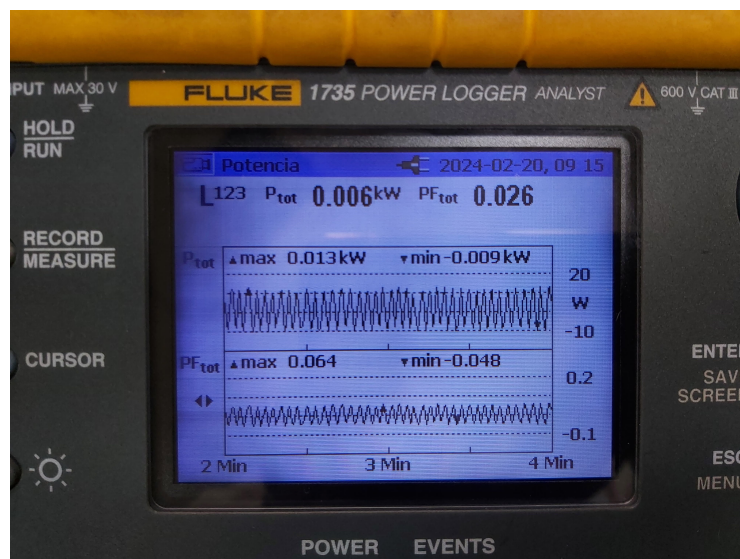


Figura B.2: Medición de potencia con Fluke 1735 de 2-4 minutos.

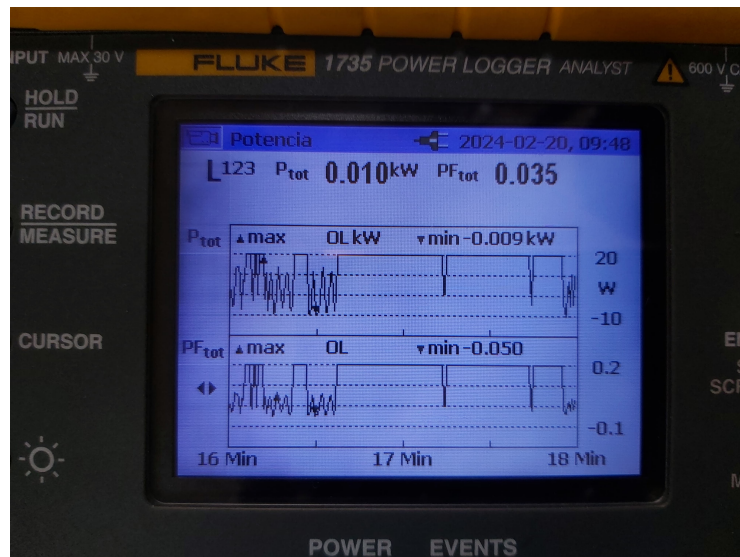


Figura B.3: Medición de potencia con Fluke 1735 de 16-18 minutos.

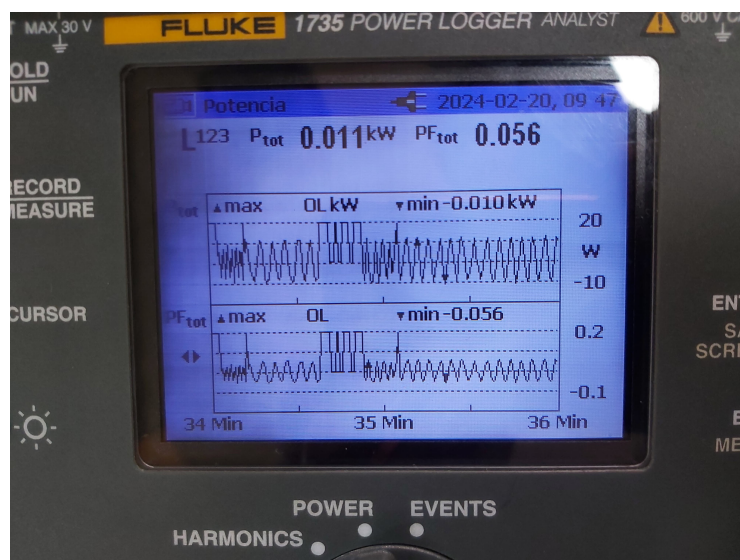


Figura B.4: Medición de potencia con Fluke 1735 de 34-36 minutos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABB, “Manual de usuario variadores de frecuencia acs355,” https://library.e.abb.com/public/c71b1454bc7a4b54aadf410fdcf53c99/ES_ACS355_UM_D.pdf, 2018, accessed: 2023-10-15.
- [2] Siemens, “Manual de sistema simatic s7-1500/et-200mp,” https://cache.industry.siemens.com/dl/files/792/59191792/att_895926/v3/s71500_et200mp_system_manual-es-ES-es-ES.pdf, 2023, accessed: 2023-12-23.
- [3] M. de Energía y Minas de Ecuador, “Consumo de energía por sector y fuente. capítulo 4.” <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/capitulo4.pdf>, 2022, accessed: 2023-11-13.
- [4] M. de Energía y Minas de Perú, “Guía n^o2. elaboración de proyectos de guías de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético. agroindustria,” <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/capitulo4.pdf>, 2008, accessed: 2023-11-13.
- [5] —, “Guía n^o14. elaboración de proyectos de guías de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético. edificios públicos,” <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/capitulo4.pdf>, 2014, accessed: 2023-11-13.
- [6] —, “Guía n^o2. elaboración de proyectos de guías de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético. sector comercial,” <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/capitulo4.pdf>, 2008, accessed: 2023-11-13.
- [7] M. L. Sanguano, “Control automático para bombeo de agua con variadores de velocidad para obtener presión constante,” *Universidad de Ciencias y Humanidades*, 2019.

- [8] ABB, “Abb revista: Agua,” <https://library.e.abb.com/public/7ea3410aad33379bc125796d00530e00/Revista>, 2011, accessed: 2023-10-10.
- [9] J. Manuel Viejo Zubicaray, “Bombas teoria, diseño y aplicaciones,” *Mexico: Limusa SA*, 2004.
- [10] P. Group, “Cables thhn/thwn-2,” <https://co.prysmiangroup.com/es/toolsdownloads>, s.f., accessed: 2024-01-30.
- [11] E. Ávila-González, A. Ríos-Hernández, Y. Morejón-Mesa, y B. Campos-Cuní, “Evolución histórica de las fuentes energéticas empleadas en el abasto de agua y riego agrícolas,” *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [12] Y. Martínez Valdés y R. Huguet Esteve, “Estaciones de bombeo: Evolución y futuro,” *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 19, no. 3, pp. 53–56, 2010.
- [13] A. Pedraza y R. Rosas, *Evaluación para sistemas de bombeo de agua: Manual de eficiencia energética*. Inter-American Development Bank, 2011.
- [14] X. Peng, L. Xiao, Z. Mo, y G. Liu, “The variable frequency and speed regulation constant pressure water supply system based on plc and fuzzy control,” in *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 1, 2009, pp. 910–913.
- [15] W.-q. He, M.-k. Cai, Y.-b. Wang, y X.-j. Wang, “Automatic water supply control system of graded constant pressure by variable frequency speed and its application to pipeline irrigation,” in *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*, vol. 1, 2010, pp. 385–388.
- [16] A. Pesántez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE LABORATORIO CON VARIADOR DE FRECUENCIA PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE BOMBEO Y DETERMINACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO.” 2012.
- [17] M. Pulido, *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*, ser. ACCESO RÁPIDO. Marcombo, 2000. [En línea]. Recuperable: <https://books.google.com.ec/books?id=iWP2zQuTOl8C>
- [18] J. Pacheco, “ESTUDIO DE UN SISTEMA DE CONTROL MULTIBOMBAS PARA UN HOTEL UTILIZANDO UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA,” 2015.

- [19] J. C. Romo, “Calibración de sensores de presión de alta frecuencia para su uso en modelos físicos hidráulicos,” B.S. thesis, Universidad Nacional de Córdoba, 2019.
- [20] H. Díaz, G. Trujillo, y A. Román-Gonzalez, “Diseño de un sistema de control para obtener presión constante de agua.” in *”XXII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, COMPUTACIÓN Y AFINES” INTERCON 2015*, 2015.
- [21] B. S. Díaz Peña, A. G. Galarza Espinosa *et al.*, “Diseño y simulación del control del proceso de tratamiento y sistema de presión constante de la línea de distribución de agua de una fábrica de bebidas gaseosas,” B.S. thesis, Espol, 2013.
- [22] A. M. Vega Morillo, “Diseño e implementación de un sistema de control de variadores de velocidad para obtener presión constante en un edificio de la universidad simón bolívar,” B.S. thesis, QUITO/EPN/2011, 2011.
- [23] Weg, “Sistema multibombas cfw-08,” <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h9b/h98/Weg-Sistemas-Multibombas-CFW-08-10051126-es.pdf>, s.f., accessed: 2023-10-15.
- [24] Y. Paredes, “Diseño e implementación de un módulo demostrativo de control por variadores de velocidad para sistemas de presión constante multi-bombas(tesis de grado),” *Recuperado de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500*, vol. 12404, p. 6062, 2015.
- [25] F. H. Padilla Narváez, “Sistema de bombeo de agua a presión constante mediante la aplicación de variadores de velocidad,” B.S. thesis, Quito: EPN, 2000., 2000.
- [26] R. L. Mott, *Applied fluid mechanics*. Pearson Educación, 2006, vol. 1.
- [27] L. F. Quezada Díaz y J. I. Salazar Santamaria, “Diseño de un sistema de control de presión de agua en función de la demanda para el laboratorio de ingeniería electrónica–unprg.” Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2018, accessed: 2023-11-30.
- [28] J. A. S. Márquez, “Optimización del proceso de diseño de prototipos mediante simulaciones de forma en 3d empleando autodesk fusion 360,” *Universidad de Guanajuato. Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado*, 2022.

- [29] J. G. M. A. Johnny Álvarez Salazar, *TIA Portal. Aplicaciones de PLC*. Medellín: Editorial ITM, 2017, eISBN: 9789585414112(HTML). [En línea]. Recuperable: <https://doi.org/10.22430/9789585414112>