



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO
PARA EL ESTUDIO DEL DRENAJE DE LÍQUIDOS
EN UN TANQUE CILÍNDRICO VERTICAL**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

**CARLOS DANIEL COSI SUCATICONA
DANA ALLISSION TORRES TAPAYURI**

ASESORES:

**Ing. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO, Dr.
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.**

IQUITOS, PERÚ

2024



UNAP

**Facultad de Ingeniería Química
Unidad de Investigación**



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 028-CGT-FIQ-UNAP-2024

En Iquitos, en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Química, a los 07 días del mes de Diciembre de 2024, a horas 11:15 AM, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA EL ESTUDIO DEL DRENAJE DE LÍQUIDOS EN UN TANQUE CILÍNDRICO VERTICAL"**, aprobado con Resolución Decanal N° 315-2024-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Carlos Daniel Cosi Sucaticona y Dana Allission Torres Tapayuri**, para optar el título profesional de **Ingeniero Químico**, que otorga la Universidad de acuerdo Ley y Estatuto.

El jurado calificador y dictaminador designado mediante R. D. N° 295-2024-FIQ-UNAP está integrado por:

Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.	Presidente
Ing. SUMNER SHAPIAMA ORDOÑEZ, MSc.	Miembro
Ing. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc.	Miembro

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: SATISFACTORIAMENTE

El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y la tesis ha sido: APROBADA con la calificación BUENA, estando los bachilleres aptos para obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico. Siendo las 12:00 m se dio por terminado el acto de SUSTENTACION

Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.
Presidente de Jurado

Ing. SUMNER SHAPIAMA ORDOÑEZ, MSc.
Miembro

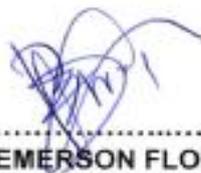
Ing. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc.
Miembro

Ing. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO, Dr.
Asesor

Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor



JURADO Y ASESOR



.....
Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.
Presidente de Jurado



.....
Ing. SUMNER SHAPIAMA ORDOÑEZ, MSc.
Miembro



.....
Ing. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc.
Miembro



.....
Ing. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO, Dr.
Asesor



.....
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor

RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD



COSI SUCATICONA / TORRES TAPAYURI

FIQ_TESIS_COSI SUCATICONA_TORRES TAPAYURI.pdf

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::20208:416637233

Fecha de entrega

16 dic 2024, 2:09 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 dic 2024, 10:35 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

FIQ_TESIS_COSI SUCATICONA_TORRES TAPAYURI.pdf

Tamaño de archivo

1.4 MB

58 Páginas

13,306 Palabras

63,447 Caracteres



25% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

23% Fuentes de Internet

1% Publicaciones

21% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Texto oculto

28 caracteres sospechosos en N.º de páginas

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mi madre, Luzmila, cuyo amor y sacrificio han sido mi mayor inspiración. A mi padre, Daniel, por su apoyo incondicional y sabios consejos. Y a mis profesores, por compartir su conocimiento y por su dedicación en mi formación académica.

Carlos Daniel Cusi Sucaticona

Dedico esta tesis a mi abuela Zoila, cuyo amor y apoyo incondicional han sido fundamentales en mi camino académico. A mis profesores, que me inspiraron y guiaron con sabiduría. Y a una buena amiga y madre Gladys, por su constante aliento y compañía en cada paso de esta travesía.

Dana Allission Torres Tapayuri

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud, en primer lugar, a Dios, ya que, sin su bendición y guía, este proyecto no habría sido posible. También agradezco a mis asesores, los ingenieros Jorge Armando Vásquez Pinedo y Fernando Javier Salas Barrera, cuyo conocimiento y apoyo fueron fundamentales para la conclusión de este trabajo. A mi mamá Luzmila y mi papá Daniel, quienes estuvieron siempre atentos y brindándome su apoyo constante para asegurar que todo salga bien.

Carlos Daniel Cosi Sucaticona

Agradezco profundamente a mis asesores los ingenieros Jorge Armando Vásquez Pinedo y Fernando Javier Salas Barrera, por su guía y paciencia durante todo el desarrollo de este trabajo. También a Gladys quien me brindo aliento constante. Sin ustedes, esta meta no hubiera sido posible.

Dana Allission Torres Tapayuri

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
JURADO Y ASESORES	iii
RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Bases teóricas	6
1.2.1. Ecuación de balance de masa para procesos no reactivos en régimen transitorio	6
1.2.2. Ecuación de continuidad	7
1.2.3. Principio de conservación de la energía	8
1.2.4. Número de Reynolds	10
1.2.5. Factor de fricción	10
1.2.6. Ecuación de Darcy Weisbach	11
1.2.7. Pérdidas de carga menores	12
1.2.8. Sistema de control automático	14
1.3. Definición de términos básicos	17
1.3.1. Variables de control automático	17
1.3.2. Variables de la operación de drenaje	18
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	21
2.1. Formulación de la hipótesis	21
2.2. Variables y su operacionalización	21
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	25
3.1. Tipo y diseño	25
3.1.1. Determinación de las dimensiones del tanque cilíndrico vertical	27
3.1.2. Esquema del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical	28
3.1.3. Deducción de la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula	

con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical	32
3.1.4. Elaboración del circuito de control	35
3.1.5. Deducción de las ecuaciones que muestran la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas del PLC	39
3.1.6. Esquema de instalación eléctrica	40
3.1.7. Construcción e instalación del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical	41
3.2. Diseño muestral	44
3.3. Procedimientos de recolección de datos	45
3.4. Procesamiento y análisis de datos	48
3.5. Aspectos éticos	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	50
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	54
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	55
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	57
ANEXOS	60
Anexo 1. Matriz de consistencia	61
Anexo 2. Manual de instrucciones del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical	62
Anexo 3. Especificaciones técnicas de los componentes del sistema de control	68

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Relación de longitud equivalente para algunos tipos de válvulas y accesorios	13
Tabla 2. Descripción de variables e indicadores en el control automático	23
Tabla 3. Descripción de variables e indicadores en la operación de drenaje	24
Tabla 4. Dimensiones del tanque cilíndrico vertical y de la tubería de la línea de descarga	45
Tabla 5. Cantidades requeridas para evaluar el factor de fricción promedio	46
Tabla 6. Evaluación del factor de fricción promedio	46
Tabla 7. Datos requeridos para la evaluación del factor Φ	47
Tabla 8. Resultados teóricos de las variables intervinientes	50
Tabla 9. Determinación del tiempo de funcionamiento de la electroválvula	50
Tabla 10. Resultados teóricos y experimentales de la altura final de líquido	52
Tabla 11. Resultados teóricos y experimentales del volumen final de líquido	52
Tabla 12. Comparación de resultados para el volumen de drenaje	53

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración gráfica del principio de continuidad	8
Figura 2. Sistema de flujo que representa el principio de conservación de la energía	9
Figura 3. Coeficientes de resistencia desde la salida de un tanque a una tubería	13
Figura 4. Elementos que conforman la arquitectura básica de un PLC	14
Figura 5. Representación de un sistema de ecuaciones mediante un diagrama ladder	15
Figura 6. Interfaz de comunicación entre una PC y el PLC	16
Figura 7. Electroválvula	17
Figura 8. Esquema del diseño de investigación para el control automático	25
Figura 9. Esquema del diseño de investigación para la operación de drenaje	26
Figura 10. Rolado de la plancha de acero naval	27
Figura 11. Esquema del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical	29
Figura 12. Esquema de la línea de llenado del tanque cilíndrico vertical	31
Figura 13. Detalle del sistema de control automático	32
Figura 14. Prendido del temporizador TT1 y de la salida Q1 del PLC	37
Figura 15. Activación y desactivación de la electrobomba de llenado	38
Figura 16. Esquema de instalación eléctrica	40
Figura 17. Tanque cilíndrico vertical, el visor y la regla graduada	41
Figura 18. Sistema de control automático	42
Figura 19. Vista real de la parte interior del tablero de control	42
Figura 20. Vista completa del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical	43

RESUMEN

El objetivo general de la presente investigación fue: diseñar y construir un equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, del cual fueron sus componentes principales: un tanque cilíndrico vertical de 0.5 m de diámetro y 0.7 m de altura, un visor con regla graduada, un PLC, una electroválvula, una interfaz de comunicación y una llave térmica. Para deducir la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en dicho tanque, se aplicó las ecuaciones de balance de masa, de continuidad y de conservación de la energía. Los valores de la altura inicial del líquido junto con los del volumen de drenaje, en las ocho pruebas realizadas fueron: (53 cm, 20 L); (42.5 cm, 18 L); (33 cm, 15 L); (25.4 cm, 20 L); (54.8 cm, 20 L); (44 cm, 18 L); (34.5 cm, 15 L) y (27 cm, 16.5 L); resultando el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con el porcentaje de error del volumen de drenaje: (179.1 s, 3.08 %); (176.6 s, 3.63 %); (162.1 s, 0.52 %); (244.5 s, 4.77 %); (176.5 s, 4.07 %); (174.5 s, 3.63 %); (159.2 s, 1.83 %) y (194.1 s, 4.8 %); comprobándose de esta forma que la ecuación deducida tiene una fiabilidad mayor del 95 %, lo cual indicó que se alcanzó el objetivo general y a su vez se probó la hipótesis general.

Palabras clave: altura de líquido, volumen de drenaje, electroválvula, PLC, tiempo de funcionamiento.

ABSTRACT

The general objective of the present investigation was: to be designed for and to construct an equipment automated for the study of the liquids drainage in a cylindrical vertical tank, of which were its main components: a cylindrical vertical tank of 0.5 m of diameter and 0.7 m of height, a viewfinder with gauged rule, a PLC, an electric valve, an interface of communication and a thermic key. In order to deduct the equation between the passage of time from initial and final functioning of the electroválvula with the heights of liquid in the aforementioned tank, was applicable the equations of balance of mass, of continuity and of conservation of energy. The values of the initial height of the liquid along with the ones of the draining volume, in the eight realized proofs were: (53 cm, 20 L); (42.5 cm, 18 L); (33 cm, 15 L); (25.4 cm, 20 L); (54.8 cm, 20 L); (44 cm, 18 L); (34.5 cm, 15 L) and (27 cm, 16.5 L); proving to be the passage of time of functioning of the electric valve along with the percentage of error of the draining volume: (179.1 s, 3.08 %); (176.6 s, 3.63 %); (162.1 s, 0.52 %); (244.5 s, 4.77 %); (176.5 s, 4.07 %); (174.5 s, 3.63 %); (159.2 s, 1.83 %) and (194.1 s, 4.8 %); being proved in this way that the deduced equation has a bigger reliability of the 95 %; which indicated that the general objective was caught up with and in turn it tried on its general hypothesis.

Keywords: height of liquid, draining volume, electric valve, PLC, operating time.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, muchas de las operaciones y procesos que se realizan en las industrias, se llevan a cabo mediante sistemas automatizados, lo cual implica que los ingenieros tengan un conocimiento amplio sobre mecánica de fluidos y automatización de procesos. En la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), los cursos de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos forman parte del plan de estudio, ya que mediante estos cursos se facilitan las bases teóricas precisas para que el estudiante de la FIQ-UNAP, esté en la capacidad de desarrollar proyectos relacionados a la automatización e instrumentación de los equipos más utilizados en la industria de procesos químicos. Un problema que se presenta con mucha frecuencia, es determinar el tiempo que dura la operación de drenaje de un líquido en un tanque cilíndrico vertical, el mismo que cuenta con una línea de descarga en donde se encuentra instalada una electroválvula, lo cual da a conocer que necesariamente se tenga que hacer uso de la ecuación de balance de masa en régimen transitorio, la ecuación de continuidad y la ecuación general de energía para determinar una ecuación entre el tiempo con la altura de líquido en dicho tanque, la cual se programaría en un sistema de control automático, comprobándose de este modo que la electroválvula se encuentre prendida todo el tiempo programado.

En la FIQ-UNAP, ya existen algunos trabajos de tesis relacionados a los cursos de mecánica de fluidos y automatización de procesos; sin embargo, en ninguno de ellos se muestra cómo realizar de forma automática la operación de drenaje de un líquido en un tanque cilíndrico vertical, lo cual hace que no sea suficiente la formación académica del estudiante de dicha facultad; generándose de esta forma, ciertas debilidades académicas con respecto al control automático de operaciones de transporte de fluidos en régimen transitorio.

De este modo, es que, en la presente tesis se enuncia la interrogante general: ¿cuáles serían los componentes, con los que debe contar el equipo automatizado para realizar adecuadamente el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical?

En relación a lo mencionado en los párrafos precedentes, se enuncian seguidamente, los problemas específicos:

Problemas específicos

- ¿Es posible deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical?
- ¿Es posible deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical?
- ¿Cuál es el circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical?
- ¿Es posible deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico?

De esta forma, continuando el mismo orden de ideas con respecto al problema general y a los problemas específicos, se fundamentan el objetivo general y los objetivos específicos.

Objetivo general

Diseñar y construir un equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.

Objetivos específicos

- Deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical.
- Deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical.
- Elaborar el circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.
- Deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico.

El presente trabajo de tesis es importante, ya que será una contribución a la activación de los laboratorios de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), optimizándose de esta manera los escenarios de aprendizaje en donde se lleven a cabo las clases teóricas y prácticas en los mencionados cursos; lo cual va a generar nuevas habilidades concernientes al diseño, simulación, automatización y control automático de operaciones de transporte de fluidos en régimen transitorio, en toda la población académica de la FIQ-UNAP.

La presente tesis tiene en su estructura ocho (8) capítulos, los cuales se indican a brevemente a continuación:

- Capítulo I: se indican los antecedentes, las bases teóricas y la definición de términos básicos.
- Capítulo II: comprende las hipótesis y las variables de estudio.
- Capítulo III: está conformado por la metodología, el diseño muestral, los procedimientos de recolección de datos y el procesamiento y análisis de datos.
- Capítulo IV: se muestran y describen los resultados
- Capítulo V: comprende la discusión de resultados.
- Capítulo VI: concierne a las conclusiones.
- Capítulo VII: se indican las recomendaciones.
- Capítulo VIII: se dan a conocer las fuentes de información que se citaron en todo el desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

- El año 2024, se desarrolló la investigación con enfoque cuantitativo, nivel aplicativo y diseño correlacional, cuyo objetivo general fue implementar un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, incluyéndose tres (3) poblaciones de estudio en relación a las operaciones realizadas: control automático, llenado y vaciado, las cuales estuvieron conformadas por catorce (14) elementos de un diagrama ladder (2 marcas internas, 2 salidas físicas, 8 contactos y 2 temporizadores) y las múltiples pruebas de llenado y vaciado, respectivamente. En dichas operaciones, las muestras se eligieron a criterio de los investigadores, las cuales resultaron: las 2 salidas físicas las cuales se conectaron a las electrobombas de llenado y vaciado y diez (10) pruebas de funcionamiento; es decir, cinco (5) pruebas en el llenado y cinco (5) en el vaciado. Para lograr el objetivo general, primeramente, tuvieron que determinar la relación entre el volumen con el nivel de líquido, la cual la adecuaron y programaron en Microsoft Excel 2023 para determinar el volumen inicial y el valor experimental del volumen final de líquido. La implementación del sistema automatizado se conformó por los siguientes dispositivos: un relé programable, dos pulsadores NC, dos pulsadores NA, dos luces led, una llave térmica con su enchufe bipolar, un visor con regla graduada, una línea de llenado (conformada por tramos de tubería y accesorios, la electrobomba de llenado y un contador de volumen) y una línea de vaciado (conformada por tramos de tubería y accesorios, la electrobomba de vaciado y un contador de volumen). Los resultados obtenidos al aplicar dicha relación en la operación de llenado, mostraron que el mínimo (0.316 %) y máximo (0.782 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido les correspondieron a las pruebas 5 y 3. De la misma forma, para la operación de vaciado, el mínimo (0.205 %) y máximo (1.384 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido les correspondieron a las pruebas 4 y 5; lo cual indicó que el máximo error porcentual con respecto al volumen final de líquido, lo obtuvieron en la operación de vaciado. De esta forma finiquitaron esta investigación, lográndose el objetivo general y a la vez probándose la hipótesis general (Dávila y Grández, 2024, pp. xi, 1-55).

- El año 2023, se llevó a cabo la investigación de tipo aplicada con enfoque cuantitativo y diseño correlacional, cuyo objetivo general fue realizar el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, mediante la implementación de un sistema automatizado, incluyéndose las poblaciones de acuerdo a las operaciones realizadas: control automático y drenaje de un líquido, las cuales estuvieron conformadas por siete (7) elementos de un diagrama ladder (1 marca interna, 1 salida física, 4 contactos y 1 temporizador) y las múltiples pruebas de funcionamiento, respectivamente. En dichas operaciones, la muestra se eligió a criterio de los investigadores, las cuales fueron: la salida física que se conectó a una válvula solenoide y ocho (8) pruebas de funcionamiento. Para lograr dicho objetivo, tuvieron que hacer uso de la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía, deduciéndose de esta forma el modelo matemático mediante el cual determinaron el tiempo para drenar una cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos. El sistema automatizado estuvo conformado por los siguientes componentes: un relé programable, el software Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y una llave térmica con su enchufe bipolar. Los resultados obtenidos indicaron que el máximo porcentaje de error, con respecto al nivel final de líquido, el volumen final de líquido y el volumen de drenaje, son: 1.27 %, 3.85 % y 2.02 %, respectivamente; demostrándose de esta manera, que al hacer uso del mencionado modelo se consiguen resultados con una confianza mayor al 95 %. De esta forma concluyeron esta investigación, cumpliendo con el objetivo general y al mismo probando la hipótesis general (Estrella y Panduro, 2023, pp. xi, 1-60).
- En el año 2018, se efectuó el trabajo de tesis de tipo aplicativo con enfoque cuantitativo y diseño correlacional, cuyo objetivo general fue: diseñar, construir y controlar una planta de llenado y vaciado de tanques, para lo cual tuvieron que cumplir los siguientes objetivos específicos: modelar matemáticamente la planta, seleccionar los componentes para su construcción, sintonizar su controlador, realizar la simulación teórica y el control en tiempo real. El sistema de este proyecto estuvo conformado por dos tanques, de los cuales fluía agua de uno a otro a través de una válvula que se abría y se cerraba en relación al caudal

requerido para conservar el nivel de líquido en el segundo tanque, del cual salía el fluido y entraba reiteradamente al primer tanque, cerrando de esta manera el ciclo del flujo de líquido. Para la simulación utilizaron Simulink de Matlab, para lo cual tuvieron que sintonizar el controlador PID, considerándose una entrada tipo escalón y asignándose el valor del nivel final que deseaban obtener. Los resultados con respecto a los parámetros de sintonía del controlador fueron: $K_p = 15$, $\tau_i = 80$ y $\tau_d = 80$, donde K_p es la ganancia estática, τ_i es el tiempo integral y τ_d es el tiempo derivativo. De esta forma consiguieron una respuesta inmediata del controlador PID, con un sobre impulso aproximadamente del 10 %, lo cual disminuyó totalmente los errores en régimen permanente (López, 2018, pp. 1-39).

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación de balance de masa para procesos no reactivos en régimen transitorio

Dávila y Grández (2024, p. 6), señalan que la ecuación de balance de masa, para procesos no reactivos en régimen transitorio, se encuentra adecuada para tres cantidades: acumulación, entrada y salida, las mismas que se relacionan como se indican a continuación:

$$\text{ACUMULACIÓN} = \text{ENTRADA} - \text{SALIDA.} \quad (1)$$

Ahora, considerándose que $\widehat{\mathcal{M}}_E$ (kg/s) y $\widehat{\mathcal{M}}_S$ (kg/s) representan a las velocidades másicas mediante las cuales la sustancia \mathcal{A} , correspondientemente ingresa y sale de un recipiente. Entonces, al efectuarse un balance de masa de dicha sustancia, desde un tiempo t , hasta un tiempo después $t + \Delta t$, la ecuación (1) queda como se muestra a continuación:

$$\Delta \mathcal{M} = (\widehat{\mathcal{M}}_E - \widehat{\mathcal{M}}_S) \Delta t. \quad (2)$$

Donde $\Delta \mathcal{M}$ (kg), es la cantidad de masa acumulada de la sustancia \mathcal{A} dentro del recipiente en el periodo Δt (s).

Teniéndose en cuenta que Δt es bastante pequeño, es decir: ($\Delta t \rightarrow 0$), para lo cual se consideran a las cantidades $\widehat{\mathcal{M}}_E(\text{kg/s})$ y $\widehat{\mathcal{M}}_S(\text{kg/s})$ como constantes. En consecuencia, se podrá dividir a cada una de las cantidades de la ecuación (2) entre Δt y a su vez aplicarse el criterio de la primera derivada (Venero, 2023, pp. 392-393), obteniéndose de esta manera la siguiente ecuación:

$$\frac{d\mathcal{M}}{dt} = \widehat{\mathcal{M}}_E - \widehat{\mathcal{M}}_S. \quad (3)$$

La ecuación (3), es la representación matemática del balance de masa para procesos no reactivos en régimen transitorio. En el caso de que la sustancia \mathcal{A} sea un líquido (fluido incompresible), la ecuación (3) se puede reformular en términos de la velocidad de acumulación de volumen y las velocidades volumétricas con las que ingresa $\widehat{\mathcal{V}}_E(\text{m}^3/\text{s})$ y sale $\widehat{\mathcal{V}}_S(\text{m}^3/\text{s})$ dicha sustancia de un recipiente o volumen de control, es decir:

$$\frac{d\mathcal{V}}{dt} = \widehat{\mathcal{V}}_E - \widehat{\mathcal{V}}_S. \quad (4)$$

1.2.2. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad tiene su fundamento en la ecuación general de balance de masa y en relación a la figura 1 establece lo siguiente: la masa de fluido que fluye por la sección 1 de área A_1 , es la misma que fluye por la sección 2 de área A_2 (Carbajal y Sáenz, 2023, pp. 5-6; Espinoza y Pezo, 2023, pp. 4-5), es decir:

$$\widehat{\mathcal{M}}_1 = \widehat{\mathcal{M}}_2. \quad (5)$$

Las cantidades $\widehat{\mathcal{M}}_1$ y $\widehat{\mathcal{M}}_2$, simbolizan a las velocidades másicas correspondientes a las secciones 1 y 2.

Carbajal y Sáenz (2023, p. 6), mencionan que la velocidad másica se puede representar como la multiplicación de tres cantidades: la densidad del fluido (ρ), el área perpendicular a la dirección del movimiento del fluido (A) y la rapidez lineal promedio del fluido (v), es decir:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2. \quad (6)$$

Entonces, se puede decir que la ecuación (6), matemáticamente simboliza el principio de continuidad, la cual es aplicable para todos los fluidos en general (gases o líquidos), con la condición de que la velocidad másica sea constante en las secciones 1 y 2 (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 6).

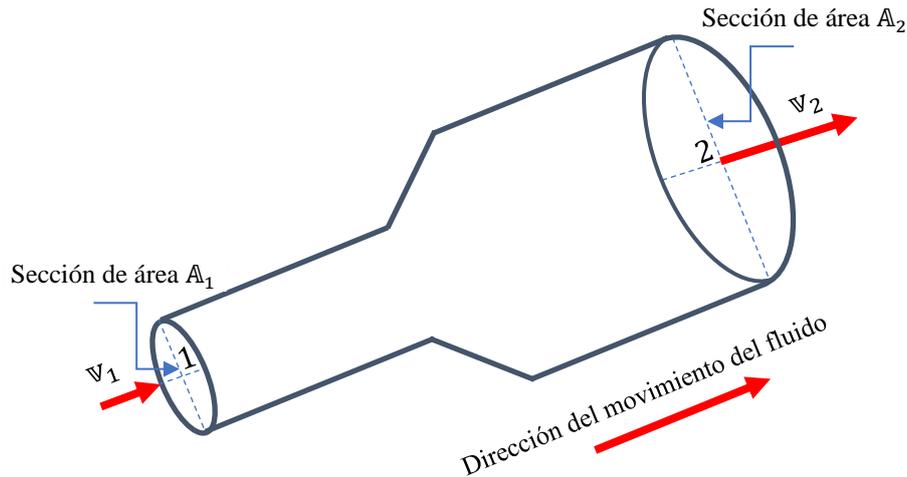


Figura 1. Ilustración gráfica del principio de continuidad.

Fuente: Modificado de Carbajal y Sáenz, 2023, p. 6.

En el supuesto de que el fluido sea un líquido; entonces, la densidad en las secciones 1 y 2 es la misma; por tanto, la ecuación (6) queda más simplificada, esto es:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2. \quad (7)$$

1.2.3. Principio de conservación de la energía

La ecuación general de energía es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, pues adicionalmente se tienen en cuenta las energías agregadas y perdidas (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 7; Estrella y Panduro, 2023, p. 7). En relación a lo que se observa en la figura 2, la energía por unidad de peso que tiene el fluido en los puntos 1 y 2, se simbolizan correspondientemente por \mathbb{E}_1 y \mathbb{E}_2 . Entonces, la formulación matemática del principio de conservación de la energía, para el sistema de flujo que se muestra en la figura 2, lo representa la siguiente ecuación:

$$E_1 + h_B - h_L = E_2. \quad (8)$$

Donde:

h_B = energía por unidad de peso de fluido, entregada por la bomba al fluido, m.

h_L = pérdidas de energía por unidad de peso de fluido, debido a la fricción más los accesorios, m.

E_1 = energía total por unidad de peso que tiene el fluido en el punto 1, m.

E_2 = energía total por unidad de peso que tiene el fluido en el punto 2, m.

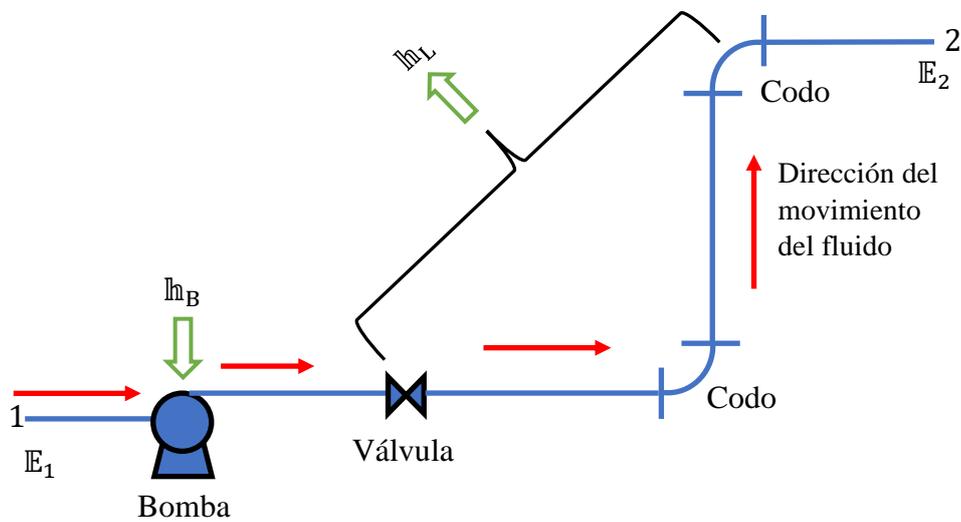


Figura 2. Sistema de flujo que representa el principio de conservación de la energía.

Fuente: Modificado de Carbajal y Sáenz, 2023, p. 8.

La energía total que tiene un fluido, es la sumatoria de tres cantidades: energía por presión, energía potencial y energía cinética (Espinoza y Pezo 2023, p. 6; Carbajal y Sáenz, 2023, p. 8). Entonces, la energía total por unidad de peso que tiene un fluido, queda representada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\mathcal{P}}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}. \quad (9)$$

Siendo \mathcal{P} , γ y v , la presión manométrica del fluido en Pa, el peso específico del fluido en N/m^3 y la rapidez lineal promedio del fluido en m/s, respectivamente. El término z es la cota o elevación en m y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad.

En consecuencia, al combinar las ecuaciones (8) y (9), se obtiene:

$$\frac{\mathcal{P}_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_B - h_L = \frac{\mathcal{P}_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (10)$$

Para el caso de líquidos, la ecuación (10) representa matemáticamente el fundamento de conservación de la energía; sin embargo, tomándose en cuenta que cada parte simboliza una porción de energía por unidad de peso de fluido, lo cual indica que se deben expresar en metros, es decir: $N \cdot m/N = m$ (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 9).

1.2.4. Número de Reynolds

Existe una cantidad adimensional, la cual indica el régimen de flujo de un fluido en una tubería circular. Dicha cantidad adimensional se conoce como el número de Reynolds ($\mathbb{R}e$) y depende específicamente de cuatro cantidades: la rapidez lineal promedio del fluido (v), la densidad del fluido (ρ), la viscosidad dinámica del fluido (η) y el diámetro interno de la tubería (D) (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 9; Saravia, 2019, p. 15).

$$\mathbb{R}e = \frac{vD\rho}{\eta}. \quad (11)$$

Cabe aclarar que las unidades de medida de las cantidades v , D , ρ y η , deben ser: m/s , m , kg/m^3 y $Pa \cdot s$, respectivamente, por lo cual $\mathbb{R}e$ es adimensional. El rango de valores que puede tomar $\mathbb{R}e$, teniéndose en cuenta el régimen de flujo en una tubería circular recta (Mott, 2015, p. 182; citado por Carbajal y Sáenz, 2023, p. 10), son los siguientes:

- $\mathbb{R}e < 2000$ (para flujo laminar).
- $2000 < \mathbb{R}e < 4000$ (para flujo transitorio).
- $\mathbb{R}e > 4000$ (para flujo turbulento).

1.2.5. Factor de fricción

El factor de fricción, también es una cantidad adimensional, la misma que depende del régimen de flujo (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 10; Estrella y Panduro, 2023, p. 10).

Hay dos ecuaciones fundamentales que permiten la valoración del factor de fricción, de las cuales una corresponde al flujo laminar y la otra al flujo turbulento (Bravo, 2020, pp. 14-16; Estrella y Panduro, 2023, pp. 10-11).

- **Factor de fricción para flujo laminar**

Para la región de flujo laminar, el factor de fricción (f) depende específicamente de $\mathbb{R}e$, de acuerdo a como se indica en la ecuación siguiente (Carbajal y Sáenz, 2023, pp. 10-11):

$$f = \frac{64}{\mathbb{R}e}. \quad (12)$$

Para la región de flujo transitorio, es imposible la evaluación de f (Estrella y Panduro, 2023, p. 11).

- **Factor de fricción para flujo turbulento**

Para la región de flujo turbulento, la evaluación del factor de fricción se realiza con la ecuación de **Swamee y Jain**, en la cual f depende de $\mathbb{R}e$ y la rugosidad relativa (D/ϵ) (Carbajal y Sáenz, 2023, p. 11), tal como se observa en la ecuación (13):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\epsilon)} + \frac{5.74}{\mathbb{R}e^{0.9}} \right) \right]^2}. \quad (13)$$

Para aplicar la ecuación (13), se debe tener en cuenta que los valores de (D/ϵ) y $\mathbb{R}e$ deben ser de 10^2 a 1×10^6 y de 5×10^3 a 1×10^8 , respectivamente (Estrella y Panduro, 2023, p. 11).

1.2.6. Ecuación de Darcy Weisbach

Esta ecuación, muestra que la pérdida de energía por unidad de peso de fluido (h_L) o pérdida de carga, depende directamente de tres cantidades: el factor de fricción (f), la carga de rapidez del fluido ($v^2/2g$) y la división de la distancia con el diámetro del tubo (L/D) (Estrella y Panduro, 2023, p. 10; Carbajal y Sáenz, 2023, p. 9), es decir:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}. \quad (14)$$

Donde:

h_L = pérdida de carga referente a la fricción, m.

f = factor de fricción, (adimensional).

L = distancia del tubo, m.

D = diámetro interior de la tubería, m.

v = rapidez lineal promedio del fluido, m/s.

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

1.2.7. Pérdidas de carga menores

Las pérdidas de carga menores, están referidas a las pérdidas de energía que experimenta el fluido al fluir por válvulas y accesorios (codos, contracciones, entradas y salidas de tanques, etc.) (Estrella y Panduro, 2023, pp. 11-12). Para tal situación, la pérdida de carga depende de un factor denominado coeficiente de resistencia (C_R) y de la carga de rapidez promedio lineal, esto es:

$$h_L = C_R \frac{v^2}{2g}. \quad (15)$$

Al comparar las ecuaciones (14) y (15), se deduce la ecuación para C_R , es decir:

$$C_R = f \frac{L_e}{D}. \quad (16)$$

En donde (L_e/D), se denomina relación de longitud equivalente, la cual se considera constante para un tipo dado de válvula o accesorio (Carbajal y Sáenz, 2023, pp. 11-12). En la tabla 1, se puede ver algunos valores de (L_e/D).

El símbolo L_e , es conocido como longitud equivalente y representa a la longitud de la tubería recta de igual diámetro nominal que la válvula y que a su vez tuviera igual resistencia (Carbajal y Sáenz, 2023, pp. 11-12; Estrella y Panduro, 2023, p. 13; Chávez y Morales, 2021, p. 65).

Tabla 1. Relación de longitud equivalente para algunos tipos de válvulas y accesorios.

Tipo	Relación de longitud equivalente L_e/D
Válvula de compuerta - totalmente abierta	8
- abierta al 75 %	35
- abierta al 50 %	160
- abierta al 25 %	900
Electroválvula totalmente abierta	2060
Codo estándar de 90°	30
Te estándar – con flujo por la línea principal	20
Te estándar – con flujo por la ramificación	60

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 13.

- **Pérdida de carga desde la salida de un tanque a una tubería**

Una situación particular de pérdida de energía menor, se produce debido a que un líquido circula desde un tanque bastante grande hacia una tubería; lo cual significa que el líquido debe aumentar considerablemente su rapidez, desde el tanque (rapidez muy pequeña) hacia la tubería (rapidez considerablemente grande) (Estrella y Panduro, 2023, p. 13), tal como se puede observar en la figura 3.

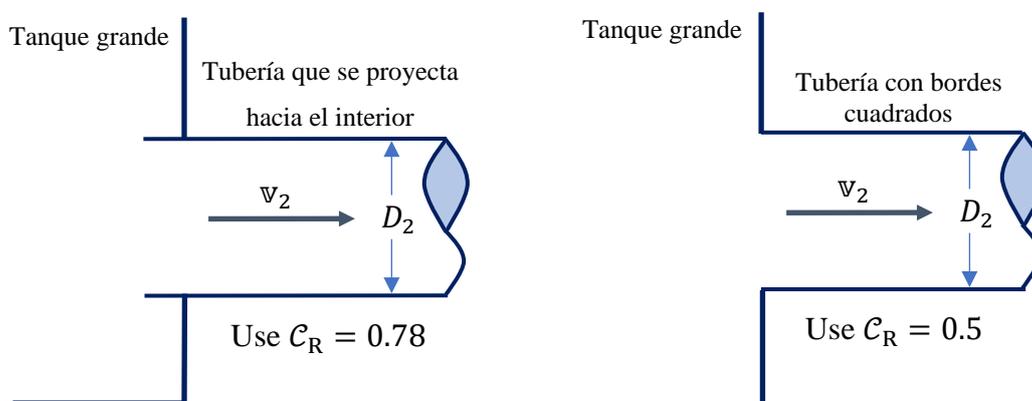


Figura 3. Coeficientes de resistencia desde la salida de un tanque a una tubería.

Fuente: Espinoza y Pezo, 2023, p. 12.

1.2.8. Sistema de control automático

Es aquel sistema que se define como el conjunto de dispositivos, los cuales cumplen funciones específicas para que pueda funcionar de forma automática o por sí sólo (Dávila y Grández, 2024, p. 11). Normalmente, un sistema de control automático, está conformado por los siguientes dispositivos: instalaciones eléctricas, controladores lógicos programables, generadores de señales (pulsadores, interruptores, sensores, etc.) y actuadores (electrobombas, compresores, electroválvulas, etc.) (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, pp. 7, 313).

- **Controlador lógico programable**

Por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller) se conoce como PLC y es denominado el cerebro del sistema de control automático, pues es el dispositivo electrónico en donde se procesa toda la información mediante la cual se controlan automáticamente a los actuadores (Dávila y Grández, 2024, p. 11; Estrella y Panduro, 2023, p. 14). También, como se puede observar en la figura 4, un PLC tiene una arquitectura básica conformada por los siguientes elementos: una fuente de alimentación, un CPU (Unidad Central de Procesamiento), módulos de entradas y salidas físicas, una pantalla LCD o display y un conector de programación (Gómez y Huayas, 2024, pp. 5-7).

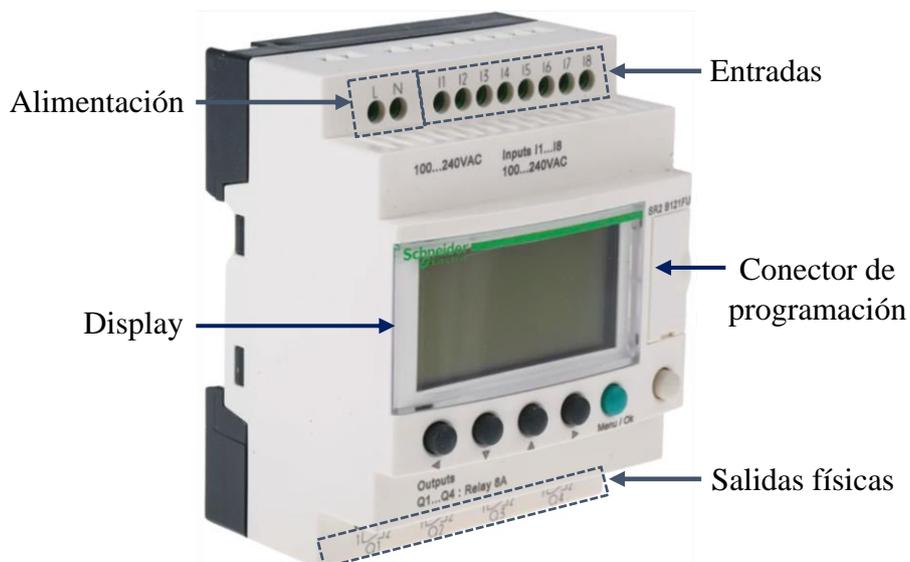


Figura 4. Elementos que conforman la arquitectura básica de un PLC.

Fuente: Tomado de Dávila y Grández, 2024, p. 12.

Todo PLC tiene un software específico para su programación, el cual en la actualidad utiliza un lenguaje de programación gráfico denominado diagrama ladder o lógica de contactos (Chong y Ferreyra, 2023, p. 12). Asimismo, se puede transferir información desde una PC a un PLC o viceversa, mediante una interfaz de comunicación o cable de transmisión de datos (véase la figura 6).

- **Diagrama ladder o lógica de contactos**

Actualmente, el lenguaje utilizado en la programación de un controlador lógico, es el diagrama ladder o lógica de contactos, el cual se fundamenta en las leyes del álgebra de Boole (Dávila y Grández, 2024, p. 14). Dicho diagrama es muy similar a un circuito lógico, el mismo que también puede representarse mediante un sistema de ecuaciones lógicas con la finalidad de mostrar la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico (Honorio y Molina, 2023, pp. 8-9).

Por ejemplo, en la figura 5 se muestra la representación del sistema conformado por las ecuaciones (17) y (18), mediante un diagrama ladder.

$$E1 * (E2 + B1) = B1. \tag{17}$$

$$B1 = S1. \tag{18}$$

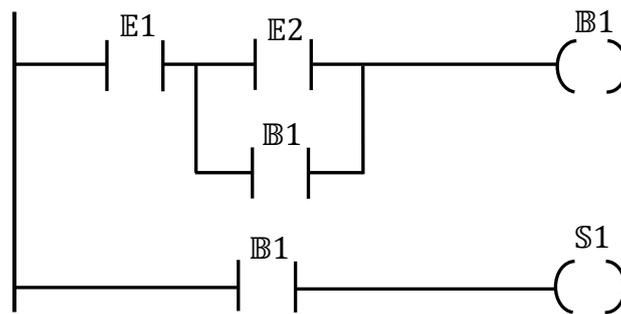


Figura 5. Representación de un sistema de ecuaciones mediante un diagrama ladder.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se puede ver el diagrama ladder para la activación de la salida S1, la cual se activará siempre y cuando el contacto B1 se encuentre cerrado. Asimismo, la

condición para que la bobina B1 se encuentre prendida y su contacto respectivo se cierre, es que necesariamente el contacto E1 debe estar cerrado.

- **Interfaz de comunicación**

Es un dispositivo electrónico conformado por un cable unido a dos puertos de comunicación: COM y USB, los mismos que se conectan o establecen comunicación con el PLC y la PC, respectivamente (Dávila y Grández, 2024, p. 12).



Figura 6. Interfaz de comunicación entre una PC y el PLC.

Fuente: Tomado de Dávila y Grández, 2024, p. 12.

- **Entradas de un PLC**

En el software de programación de un controlador lógico, las entradas están simbolizadas por la letra I, las mismas que pueden representar a los generadores de señales tales como: pulsadores, sensores, interruptores, etc. (Dávila y Grández, 2024, p. 13).

- **Salidas físicas de un PLC**

Normalmente las salidas físicas de un PLC, se simbolizan en el software de programación mediante la letra Q, las cuales pueden representar a los actuadores tales como: lámparas, electroválvulas, motores eléctricos, ventiladores, etc. (Dávila y Grández, 2024, p. 13).

- **Electroválvula**

Es un dispositivo que tiene por finalidad permitir el flujo de un fluido en una

tubería, siendo sus componentes principales: una bobina solenoide, una aguja y un émbolo, los cuales se encuentran acoplados mecánicamente (Honorio y Molina, 2023, p. 17).

Cuando se energiza la bobina solenoide, el émbolo se desplaza hasta alcanzar el centro de la bobina, lo cual hace posible que el fluido se mueva desde la entrada hasta la salida de la válvula. Del mismo modo, cuando se desenergiza la bobina solenoide, el émbolo cae por su propio peso, volviendo de este modo a su posición inicial, en la cual la electroválvula se queda completamente cerrada (Honorio y Molina, 2023, p. 17).

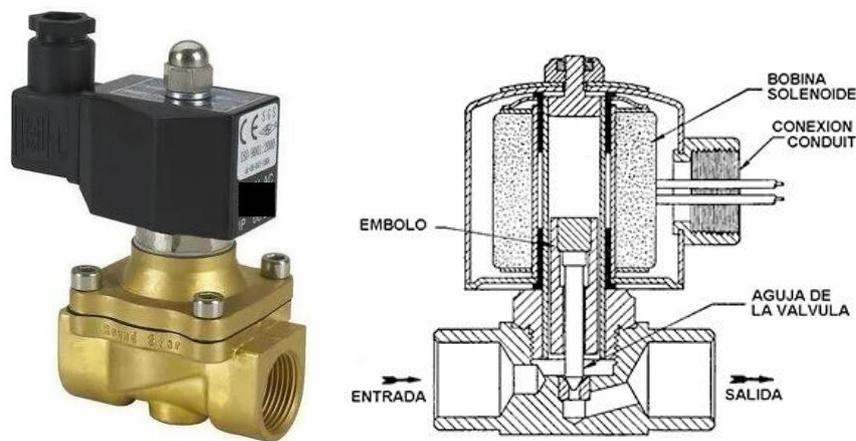


Figura 7. Electroválvula.

Fuente: Honorio y Molina, 2023, p. 18.

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1. Variables de control automático

Se refieren específicamente a la condición de las entradas, de los elementos internos y de las salidas físicas del PLC, las cuales forman parte del circuito de control. Es preciso mencionar que, para llevarse a cabo la operación de drenaje de líquidos en el tanque cilíndrico vertical de forma automática, necesariamente se debe colocar una electroválvula en la línea de descarga del tanque. Entonces, para prender a la electroválvula y mantenerla así durante un determinado tiempo, primeramente, se debe realizar el enclavamiento de una bobina interna del PLC, para lo cual necesariamente se debe presionar un pulsador verde (NA). Esto indica que en el mismo instante que se

enclava la bobina interna, se debe prender a la electroválvula y a un temporizador del PLC, mediante el cual se controlará el tiempo de funcionamiento de la electroválvula. En el caso de que se requiera parar la operación de drenaje en cualquier momento, debe existir un pulsador rojo (NC). Por tanto, se puede decir que, para llevar a cabo la operación de drenaje de líquidos en el tanque cilíndrico vertical de forma automática y segura, se deben utilizar del PLC: dos entradas, una bobina interna, un temporizador y una salida física.

- **Condición de las entradas del PLC que se vinculan a los pulsadores I1 e I2**

Se representan matemáticamente mediante las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran si el contacto de las entradas 1 y 2 del PLC se encuentran abiertas (0) o cerradas (1) (Dávila y Grández, 2024, p. 15; Gómez y Huayas, 2024, p. 17).

- **Condición de la bobina de enclavamiento M1**

Se representa con las cantidades binarias (0 o 1), las mismas que indican si la bobina interna M1 se encuentra activada (1) o desactivada (0) (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).

- **Condición del temporizador TT1**

Matemáticamente se simboliza con las cantidades binarias (0 o 1), las cuales dan a conocer si el temporizador TT1 se encuentra prendido (1) o apagado (0) (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).

- **Condición de la salida física Q1**

Su representación lógica se da mediante las cantidades binarias (0 o 1), las cuales indican si la electroválvula se encuentra prendida (1) o apagada (0), ya que esta salida se vincula a dicho actuador (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).

1.3.2. Variables de la operación de drenaje

Son aquellas que se miden en el tanque cilíndrico vertical, al inicio y al final de la operación de drenaje.

- **Altura inicial de líquido**

Representa a la cota o distancia del líquido en el tanque cilíndrico vertical al inicio de la operación de drenaje, la cual se simboliza como \mathbb{H}_i y cuyo valor se determina efectuando una inspección al visor que se encuentra acoplado al tanque cilíndrico vertical (Dávila y Grández, 2024, p. 9).

- **Volumen inicial de líquido**

Es el volumen correspondiente a la altura inicial de líquido, el cual se representa como \mathcal{V}_i (Dávila y Grández, 2024, p. 9), siendo posible su cuantificación mediante el uso de la ecuación siguiente:

$$\mathcal{V}_i = \frac{\pi}{4} D_{\text{ITCV}}^2 \mathbb{H}_i. \quad (19)$$

Donde D_{ITCV} , es el diámetro interior del tanque cilíndrico vertical.

- **Volumen de drenaje**

Es la cantidad de líquido que se evacua del tanque cilíndrico vertical, cuyo valor teórico y experimental se denotan como $\mathcal{V}_{\text{D(Teo)}}$ y $\mathcal{V}_{\text{D(Exp)}}$, respectivamente (Estrella y Panduro, 2023, p. 21). El valor de $\mathcal{V}_{\text{D(Teo)}}$ se debe fijar, verificándose previamente el valor de \mathcal{V}_i .

- **Volumen final de líquido**

Es la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico vertical al final de la operación de drenaje, estando representado su valor teórico y experimental mediante $\mathcal{V}_{\text{f(Teo)}}$ y $\mathcal{V}_{\text{f(Exp)}}$, respectivamente (Estrella y Panduro, 2023, p. 22; Dávila y Grández, 2024, p. 10), los cuales se pueden evaluar tal como se muestran en las ecuaciones siguientes:

$$\mathcal{V}_{\text{f(Teo)}} = \mathcal{V}_i - \mathcal{V}_{\text{D(Teo)}}. \quad (20)$$

$$\mathcal{V}_{\text{f(Exp)}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{ITCV}}^2 \mathbb{H}_{\text{f(Exp)}}. \quad (21)$$

Donde $\mathbb{H}_{f(\text{Exp})}$ es la altura final experimental de líquido en el tanque cilíndrico vertical, la cual se debe evaluar haciendo una inspección al visor cuando culmine la operación de drenaje. Entonces, la ecuación para evaluar el volumen de drenaje experimental, resulta combinando las ecuaciones (19) y (21), esto es:

$$\mathcal{V}_{D(\text{Exp})} = \mathcal{V}_i - \mathcal{V}_{f(\text{Exp})}. \quad (22)$$

- **Altura final de líquido**

Representa a la cota o distancia del líquido en el tanque cilíndrico vertical al culminar la operación de drenaje, cuyo valor teórico y experimental se denotan como $\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$ y $\mathbb{H}_{f(\text{Exp})}$, respectivamente (Dávila y Grández, 2024, p. 9). Entonces, al combinar las ecuaciones (19) y (20), se deduce la ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical, esto es:

$$\frac{\pi}{4} D_{\text{ITCV}}^2 \mathbb{H}_{f(\text{Teo})} = \frac{\pi}{4} D_{\text{ITCV}}^2 \mathbb{H}_i - \mathcal{V}_{D(\text{Teo})}$$

Al despejar $\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$, se obtiene:

$$\mathbb{H}_{f(\text{Teo})} = \mathbb{H}_i - \frac{4}{\pi D_{\text{ITCV}}^2} \mathcal{V}_{D(\text{Teo})}. \quad (23)$$

- **Tiempo de funcionamiento de la electroválvula**

Se define como el periodo en el que la electroválvula se encuentra activada o prendida, para drenar del tanque cilíndrico vertical el volumen de líquido establecido (Estrella y Panduro, 2023, p. 22). Se denota como t_{FEV} y su valor se programa en el temporizador del PLC.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

El equipo automatizado para realizar adecuadamente el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, debe estar conformado por los siguientes componentes: un controlador lógico programable, una interfaz de comunicación, una electroválvula, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar.

:

b. Hipótesis específicas

- Sí, es posible deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical.
- Sí, es posible deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical.
- El circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, debe ser un diagrama tipo ladder, el mismo que debe elaborarse haciendo uso del software de programación del controlador lógico.
- Sí, es posible deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico.

2.2. Variables y su operacionalización

- **En el control automático**

Variables independientes: condición de las entradas del PLC que se vinculan a los pulsadores I1(NC) e I2(NA).

Variables intervinientes: condición de la bobina de enclavamiento y condición del temporizador.

Variable dependiente: condición de la salida física del PLC que se vincula a la electroválvula.

- **En la operación de drenaje**

Variables independientes: altura inicial de líquido y volumen de drenaje.

Variables intervinientes: volumen inicial de líquido, altura final de líquido y volumen final de líquido.

Variable dependiente: tiempo de funcionamiento de la electroválvula.

Tabla 2. Descripción de variables e indicadores en el control automático.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Condición de las entradas del PLC que se vinculan con los pulsadores I1(NC) e I2 (NA).	I1 I2	Son las cantidades que muestran si el contacto de las entradas 1 y 2 del PLC se encuentran abiertas (0) o cerradas (1) (Dávila y Grández, 2024, p. 15; Gómez y Huayas, 2024, p. 17).	Cuantitativa discreta	Abierto: 0 Cerrado: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Intervinientes						
Condición de la bobina de enclavamiento	M1	Es la cantidad binaria, la misma que indica si la bobina interna M1 se encuentra activada (1) o desactivada (0) (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).	Cuantitativa discreta	Desactivado: 0 Activado: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Condición del temporizador	TT1	Es la cantidad binaria, la cual da a conocer si el temporizador TT1 se encuentra prendido (1) o apagado (0) (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).	Cuantitativa discreta	Prendido: 1 Apagado: 0	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Dependiente						
Condición de la salida física Q1	Q1	Es la cantidad binaria, la cual indica si la electroválvula se encuentra prendida (1) o apagada (0), ya que esta salida se vincula con dicho actuador (Dávila y Grández, 2024, p. 16; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).	Cuantitativa discreta	Prendido: 1 Apagado: 0	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Descripción de variables e indicadores en la operación de drenaje.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Altura inicial de líquido	H_i	Es la distancia del líquido en el tanque cilíndrico vertical al inicio de la operación de drenaje, cuyo valor se determina efectuando una inspección al visor que se encuentra acoplado a dicho tanque (Dávila y Grández, 2024, p. 9).	Cuantitativa continua	cm m	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Volumen de drenaje	V_D	Es la cantidad de líquido que se evacua del tanque cilíndrico vertical (Estrella y Panduro, 2023, p. 21).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Intervinientes						
Volumen inicial de líquido	V_i	Es el volumen correspondiente a la altura inicial de líquido (Dávila y Grández, 2024, p. 9).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Altura final de líquido	H_f	Es la distancia del líquido en el tanque cilíndrico vertical al culminar la operación de drenaje (Dávila y Grández, 2024, p. 9).	Cuantitativa continua	cm m	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Volumen final de líquido	V_f	Es la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico vertical al final de la operación de drenaje (Estrella y Panduro, 2023, p. 22; Dávila y Grández, 2024, p. 10)	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Dependiente						
Tiempo de funcionamiento de la electroválvula	t_{FEV}	Es el periodo en el que la electroválvula se encuentra activada o prendida, para drenar del tanque cilíndrico vertical el volumen de líquido establecido (Estrella y Panduro, 2023, p. 22).	Cuantitativa continua	s	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En la presente investigación, inicialmente, se ha determinado las dimensiones del tanque cilíndrico vertical (diámetro y altura), seguidamente se dedujo lo siguiente: la ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical y la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical. A continuación, se elaboró el circuito de control, el mismo que se programó en una PC utilizándose el software Zelio Soft2 V5.4.2. Seguidamente, se transfirió dicho circuito de la PC al PLC, mediante la interfaz de comunicación. Después, se procedió a realizar el montaje del sistema de control automático, el cual estuvo conformado por los siguientes componentes: controlador lógico programable (PLC), el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una electroválvula, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y una llave térmica con su enchufe bipolar. Por último, se instaló el sistema de control automático en el tanque cilíndrico vertical y se realizaron ocho (8) pruebas de funcionamiento, determinándose para cada una, el tiempo de funcionamiento de la electroválvula y los porcentajes de error del volumen de drenaje. De este modo, se hace mención, que la presente investigación es del tipo aplicada con enfoque cuantitativo y diseño correlacional. Los esquemas del diseño de investigación para el control automático y para la operación de drenaje, se muestran en las figuras 8 y 9, respectivamente.

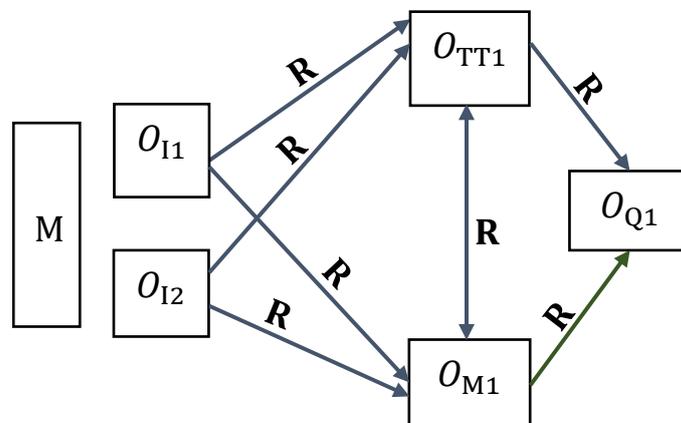


Figura 8. Esquema del diseño de investigación para el control automático.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{I1} , O_{I2} , O_{TT1} , O_{M1} y O_{Q1} son las observaciones obtenidas en cada una de las cinco variables (I1, I2, TT1, M1 y Q1, respectivamente), distintas en la muestra.

I1, I2 : condición de las entradas del PLC que se vinculan con los pulsadores I1(NC) e I2(NA) (variables independientes).

M1 : condición de la bobina de enclavamiento (variable interviniente).

TT1 : condición del temporizador (variable interviniente).

Q1 : condición de la salida física PLC que se vincula con la electroválvula (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

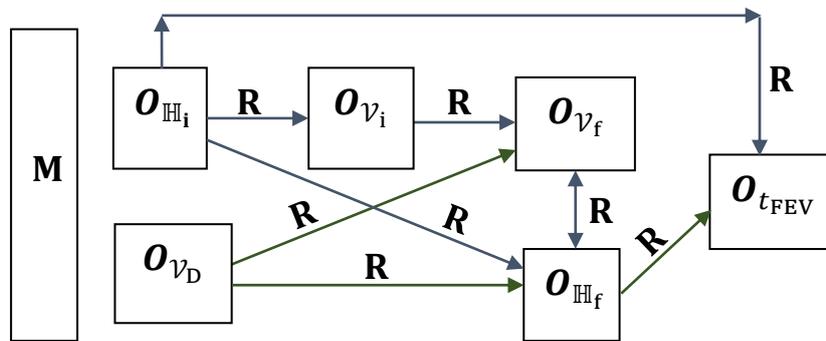


Figura 9. Esquema del diseño de investigación para la operación de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.

Donde: O_{H_i} , O_{V_i} , O_{V_D} , O_{H_f} , O_{V_f} y $O_{t_{FEV}}$, son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (H_i , V_i , V_D , H_f , V_f y t_{FEV} , respectivamente), distintas en la muestra.

H_i , : altura inicial de líquido (variable independiente).

V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).

V_D : volumen de drenaje (variable independiente).

H_f : altura final de líquido (variable interviniente).

V_f : volumen final de líquido (variable interviniente).

t_{FEV} : tiempo de funcionamiento de la electroválvula (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

3.1.1. Determinación de las dimensiones del tanque cilíndrico vertical

Las dimensiones del tanque cilíndrico vertical, se refieren específicamente al diámetro interior y a la altura del mismo, para lo cual se ha tenido en cuenta la siguiente consideración: la altura total del tanque cilíndrico vertical debe ser 1.4 veces el valor del diámetro interior, esto es:

$$\mathbb{H}_{\text{TCV}} = 1.4D_{\text{ITCV}}. \quad (24)$$

Donde D_{ITCV} y \mathbb{H}_{TCV} , son el diámetro interior y la altura del tanque cilíndrico vertical, respectivamente.

Asumiendo $D_{\text{ITCV}} = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$ y aplicando la ecuación (24), se obtiene $\mathbb{H}_{\text{TCV}} = 0.7 \text{ m}$. Entonces, el tanque cilíndrico vertical, se construye realizando el rolado de una plancha de acero naval cuyas dimensiones son: ancho (B_{Plancha}) y largo (L_{Plancha}), las cuales se calculan como se indica a continuación:

$$B_{\text{Plancha}} = \mathbb{H}_{\text{TCV}}. \quad (25)$$

$$L_{\text{Plancha}} = \pi D_{\text{ITCV}}. \quad (26)$$

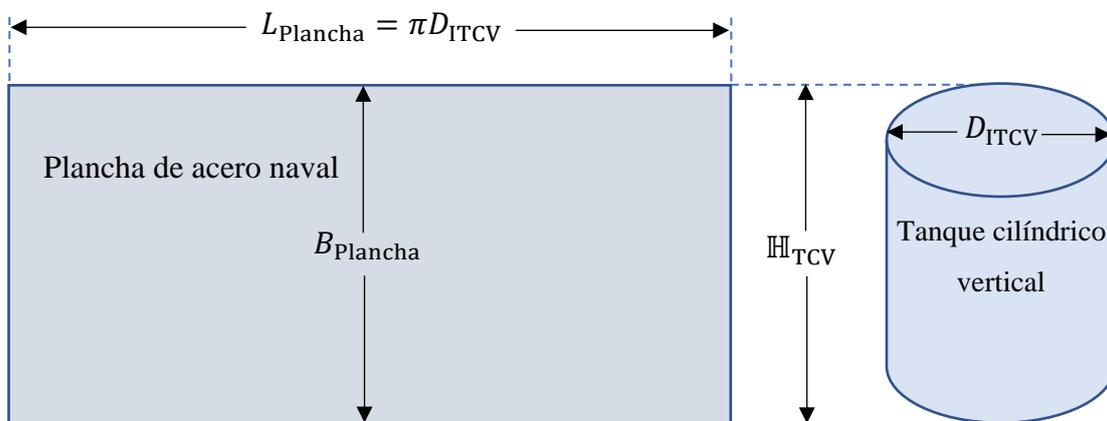


Figura 10. Rolado de la plancha de acero naval.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Esquema del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical

En la figura 11, se puede observar el esquema del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, el cual está conformado por los componentes siguientes: un tanque cilíndrico vertical, un visor con regla graduada, un controlador lógico programable (PLC), una electroválvula, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y la llave térmica con su enchufe bipolar. El controlador lógico, se programa haciendo uso del software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2 y mediante una interfaz de comunicación se le transfiere información desde una PC. Los pulsadores rojo y verde, se representan por las entradas I1 e I2 del PLC, respectivamente. El piloto indicador, se representa por la salida Q1 del PLC, ya que tiene la función de mostrar si la electroválvula se encuentra prendida o apagada.

Para drenar una determinada cantidad de volumen de líquido en el tanque cilíndrico vertical, el procedimiento será el siguiente:

- Primeramente, se debe hacer una inspección al visor para determinar la altura inicial de líquido en el tanque. Este valor se debe escribir en una celda de Microsoft Excel 2023 y determinar automáticamente el volumen inicial de líquido. A continuación, se debe escribir en otra celda el volumen de drenaje. Entonces, al tener programado en Microsoft Excel 2023, la ecuación entre el tiempo con las alturas inicial y final de líquido, se determina automáticamente la altura final de líquido, el volumen final de líquido y el tiempo de funcionamiento de la electroválvula, el cual se programa en el temporizador del PLC.
- De esta manera, cuando se presione el pulsador I2, automáticamente el PLC mandará una señal eléctrica a la salida Q1, prendiendo de esta forma a la electroválvula e instantáneamente el líquido que está dentro del tanque cilíndrico vertical empezará a fluir a través de la línea de descarga hasta llegar al tanque reservorio a lo largo de todo el tiempo que se programa en el temporizador del PLC. El funcionamiento de la electroválvula culminará cuando el temporizador termine de contar el tiempo programado, es ese instante el PLC mandará otra señal eléctrica a la electroválvula haciendo que se apague.

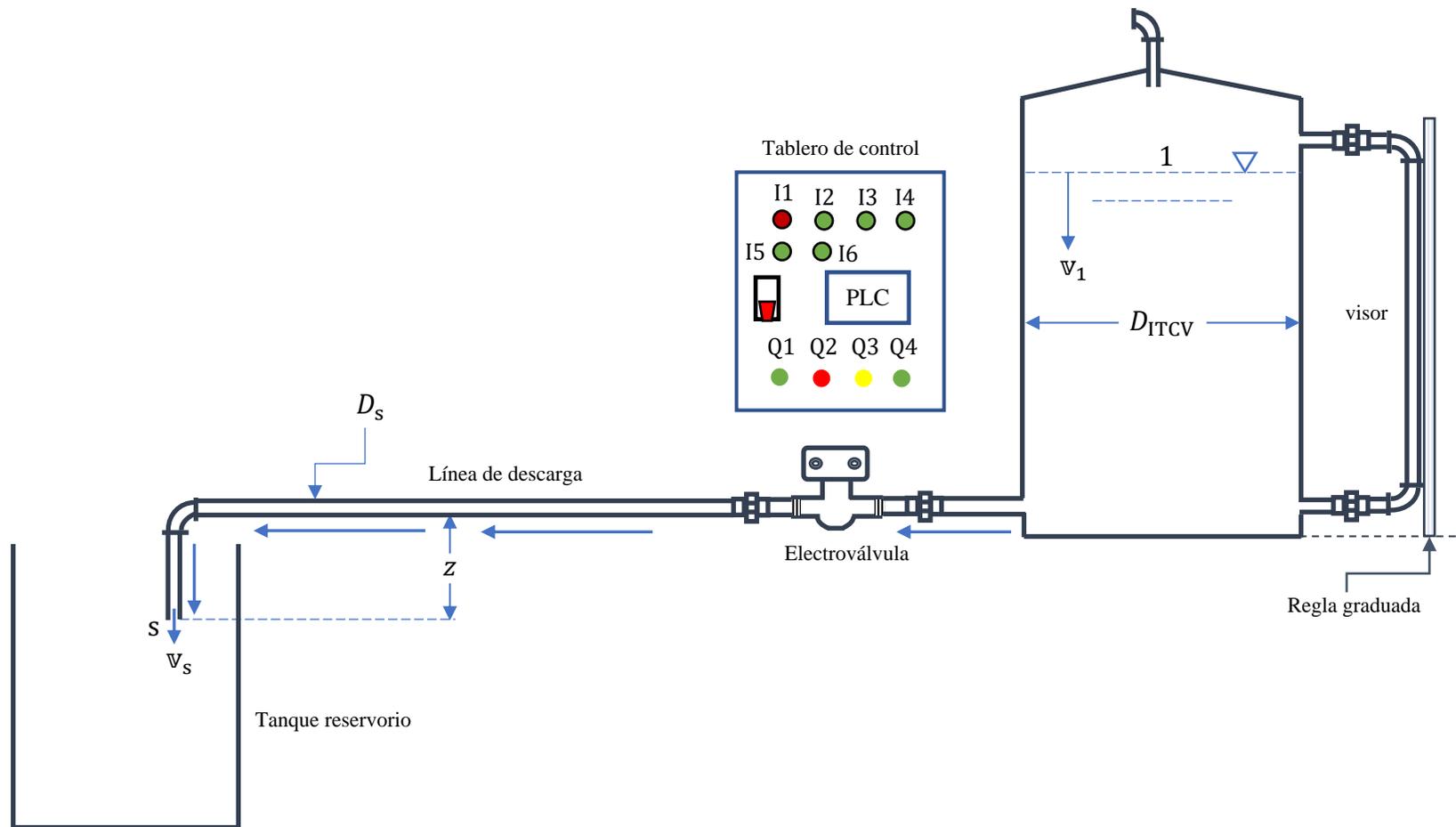


Figura 11. Esquema del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.

Fuente: Elaboración propia.

El pulsador I1, tiene la función de parar la operación de drenaje en cualquier momento que se requiera.

También, se puede observar en la figura 11, que la línea de descarga está conformada por dos uniones universales, un codo y tres tramos de tubería recta. Asimismo, se tiene un tablero de control en el cual se instalan el PLC, la llave térmica, seis pulsadores y cuatro luces leds o pilotos indicadores.

Aunque no sea el objetivo del presente trabajo, para tener comodidad y no estar llenando el tanque de forma manual, es que se ha instalado una línea de llenado, la cual está conformada por una electrobomba, accesorios (uniones universales, codos y adaptadores) y tramos de tubería recta (véase la figura 12). Para eso también se ha colocado dentro del tanque un interruptor de nivel, el mismo que se conecta a la entrada I3 del PLC; es decir, si el líquido llega al nivel bajo, el contacto de I3 se cierra y permanece así hasta que el líquido llegue al nivel alto. Dichos niveles se indican mediante los pilotos amarillo y rojo, los cuales se representan por las salidas Q3 y Q2 del PLC, respectivamente. Esto indica, que cuando el líquido llega al nivel bajo, automáticamente se deben prender la electrobomba y el piloto amarillo (Q3), los cuales deben permanecer así hasta que el líquido llegue al nivel alto. El prendido o apagado de la electrobomba, lo indica el piloto que representa a la salida Q4 del PLC. Del mismo modo, cuando el líquido llega al nivel alto, automáticamente se debe prender el piloto rojo (Q2) y apagarse la electrobomba y el piloto amarillo (Q3). Cabe mencionar, que esta situación se dará siempre y cuando se presione el pulsador I5. En es caso, el pulsador I4 tiene la función de apagar a la electrobomba en el momento que se requiera.

Si en caso el líquido no ha llegado al nivel bajo y el operador requiere prender la electrobomba, puede presionar el pulsador I6. Del mismo modo, si requiere apagar la electrobomba antes de llegar al nivel alto, basta con presionar el pulsador I1.

Para la operación de drenaje a llevarse a cabo en el tanque cilíndrico vertical, se considera que el sistema de control automático, está conformado por los siguientes componentes: el PLC, la electroválvula, los pulsadores I1 e I2, la interfaz de comunicación y la llave térmica, los cuales de detallan en la figura 13.

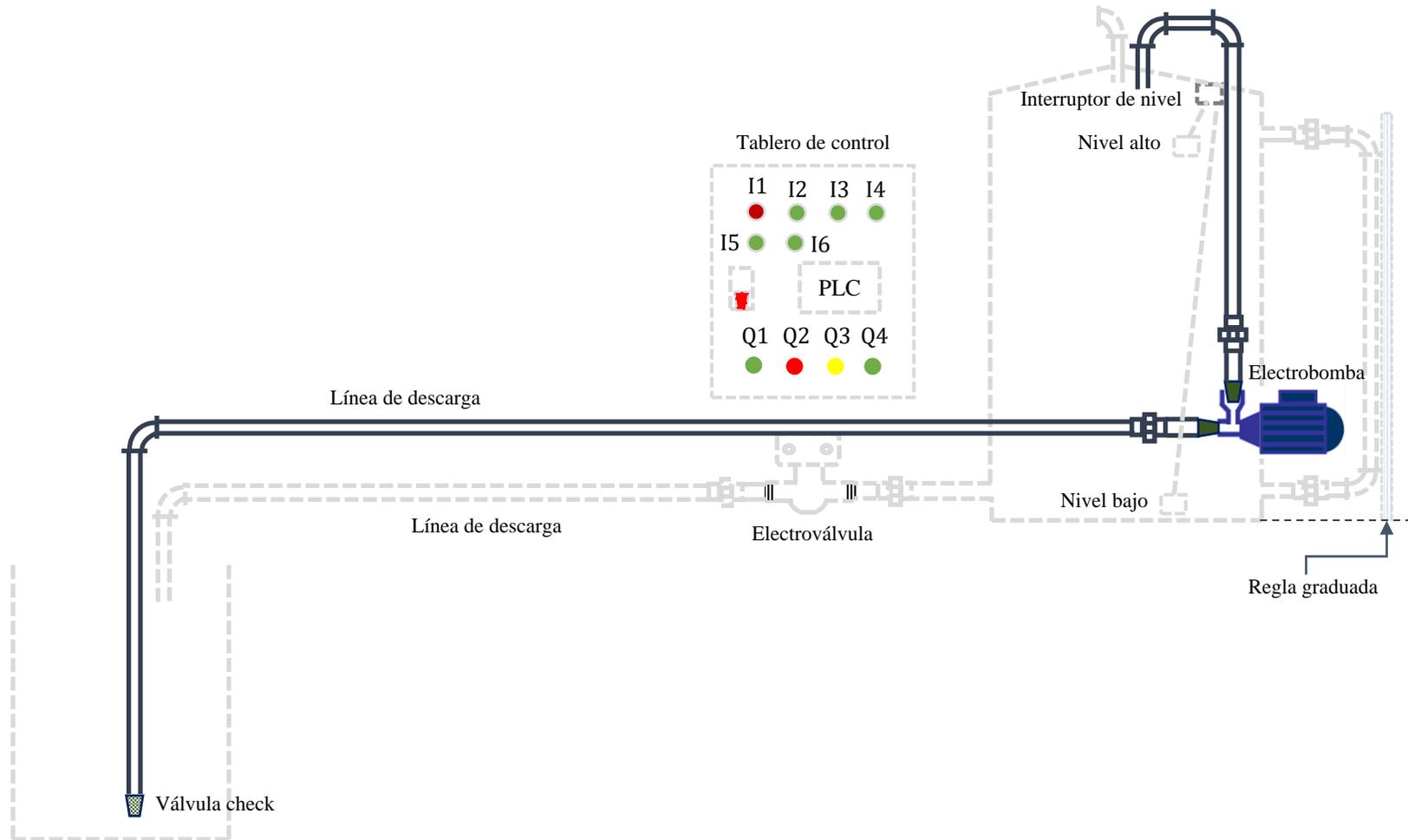


Figura 12. Esquema de la línea de llenado del tanque cilíndrico vertical.

Fuente: Elaboración propia.

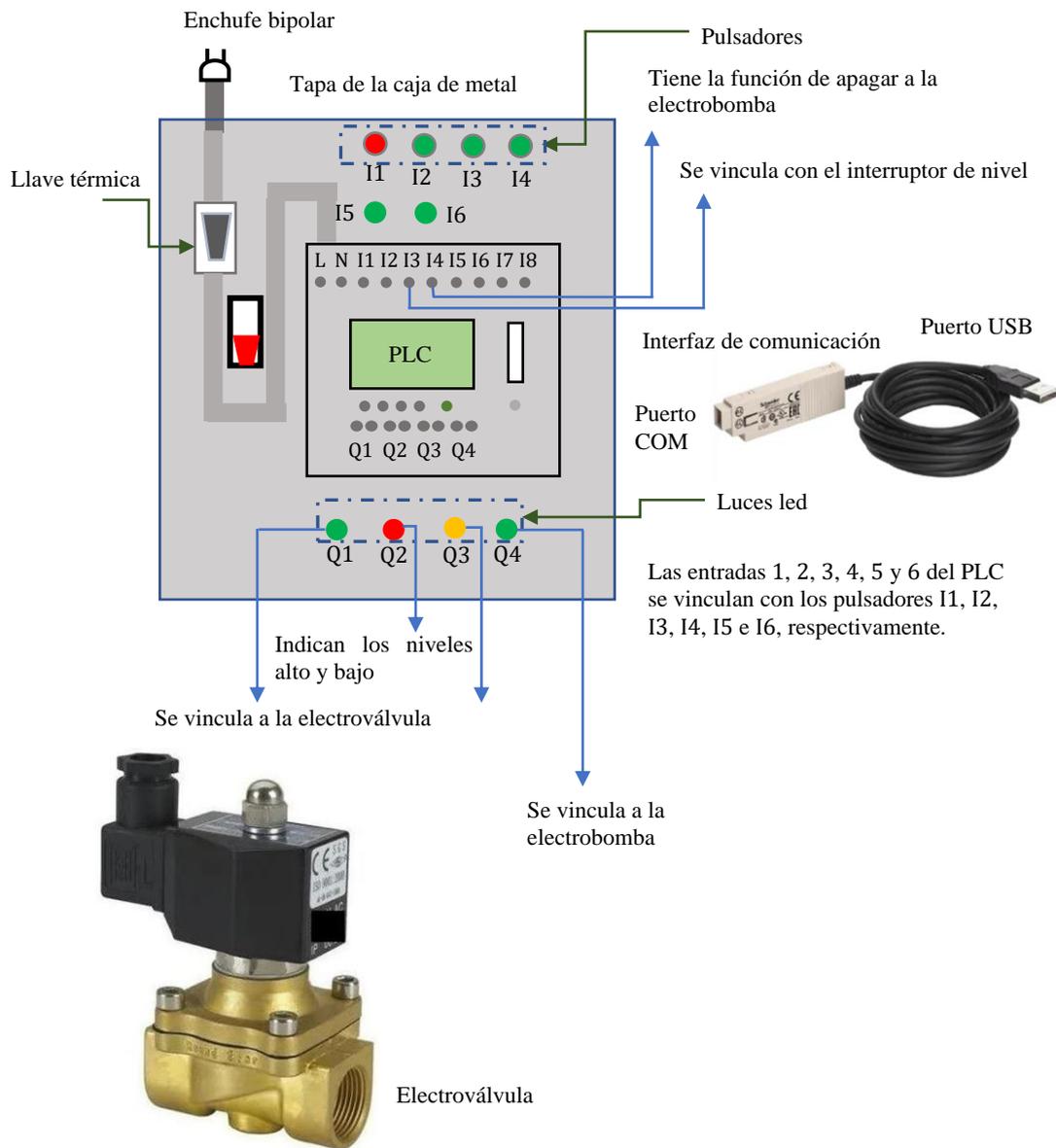


Figura 13. Detalle del sistema de control automático.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Deducción de la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical

Para deducir la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical, se hace uso de la ecuación de balance de masa para procesos no reactivos en régimen transitorio, la

ecuación de continuidad y la ecuación que representa el fundamento de conservación de la energía. Entonces, al aplicar la ecuación de balance de masa entre los puntos 1 y s que se muestran en la figura 11, se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Entrada} &= 0. \\ \text{Salida} &= \frac{\pi}{4} \rho D_s^2 v_s. \\ \text{Acumulación} &= \frac{d\mathcal{M}}{dt}. \end{aligned}$$

$$\frac{d\mathcal{M}}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi}{4} D_{ITCV}^2 H \right) = \frac{\pi}{4} \rho D_{ITCV}^2 \frac{dH}{dt}. \quad (27)$$

En consecuencia, la ecuación de balance de masa queda:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{4} \rho D_{ITCV}^2 \frac{dH}{dt} &= 0 - \frac{\pi}{4} \rho D_s^2 v_s \\ v_s &= - \left(\frac{D_{ITCV}}{D_s} \right)^2 \frac{dH}{dt}. \end{aligned} \quad (28)$$

La pérdida de carga total es:

$$h_L = C_{R(\text{Entrada})} \frac{v_s^2}{2g} + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{EV} \frac{v_s^2}{2g} + f_m \left(\frac{L_{TR}}{D_s} \right) \frac{v_s^2}{2g} + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} \frac{v_s^2}{2g}. \quad (29)$$

Se consideran las siguientes pérdidas de carga:

$$C_{R(\text{Entrada})} \frac{v_s^2}{2g} \quad (\text{a la entrada de la tubería de descarga}).$$

$$f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{EV} \frac{v_s^2}{2g} \quad (\text{en la electroválvula}).$$

$$f_m \left(\frac{L_{TR}}{D_s} \right) \frac{v_s^2}{2g} \quad (\text{en toda la tubería recta de la línea de descarga}).$$

$$f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} \frac{v_s^2}{2g} \quad (\text{en el codo de } 90^\circ).$$

Factorizando la carga de rapidez lineal y haciendo el cambio de variable:

$$h_L = \left[C_{R(\text{Entrada})} + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{EV} + f_m \left(\frac{L_{TR}}{D_s} \right) + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} \right] \frac{v_s^2}{2g} = \Phi \frac{v_s^2}{2g}. \quad (30)$$

$$\text{Donde: } \Phi = C_{R(\text{Entrada})} + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{EV} + f_m \left(\frac{L_{TR}}{D_s} \right) + f_m \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}}.$$

Ahora, aplicando la ecuación de conservación de la energía entre los puntos 1 y s, se tiene:

$$\frac{v_1^2}{2g} + H + z - h_L = \frac{v_s^2}{2g}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + H + z = (\Phi + 1) \frac{v_s^2}{2g}. \quad (31)$$

Al aplicar la ecuación de continuidad entre los puntos 1 y s, se obtiene:

$$v_1 = \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^2 v_s. \quad (32)$$

Reemplazando la ecuación (32) en la ecuación (31) y luego despejando v_s :

$$\frac{v_s^2}{2g} \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4 + H + z = (\Phi + 1) \frac{v_s^2}{2g}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4}}. \quad (33)$$

Combinando las ecuaciones (28) y (33), se logra la siguiente ecuación:

$$-\left(\frac{D_{ITCV}}{D_s} \right)^2 \frac{dH}{dt} = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4}}$$

$$\frac{d\mathbb{H}}{\sqrt{\mathbb{H} + z}} = - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^2 \sqrt{\frac{2g}{\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4}} dt$$

Ahora, haciendo el cambio de variable: $U = H + z$, e integrando:

$$\int_{U_i}^{U_f} U^{-1/2} dU = - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^2 \sqrt{\frac{2g}{\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4}} \int_0^{t_{FEV}} dt$$

$$2(\sqrt{U_f} - \sqrt{U_i}) = - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^2 \sqrt{\frac{2g}{\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4}} t_{FEV}$$

$$t_{FEV} = 2 \left(\frac{D_{ITCV}}{D_s} \right)^2 \sqrt{\frac{\left[\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4 \right]}{2g}} (\sqrt{U_i} - \sqrt{U_f})$$

$$t_{FEV} = \left(\frac{D_{ITCV}}{D_s} \right)^2 \sqrt{\frac{2 \left[\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4 \right]}{g}} \left(\sqrt{\mathbb{H}_i + z} - \sqrt{\mathbb{H}_{f(Teo)} + z} \right). \quad (34)$$

De esta forma se ha deducido la ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical, la cual es la (34).

3.1.4. Elaboración del circuito de control

Para la elaboración del circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, se ha hecho uso del software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2. Dicho circuito comprende varios procedimientos, los cuales se describen en detalle a continuación:

- **Activación de la bobina interna M1**

Para realizar este procedimiento, primeramente, se presiona el pulsador I2 (NA), de esta forma se prende la bobina M1 y su contacto respectivo se queda cerrado prentiendo automáticamente al temporizador TT1 y a la salida Q1 del PLC (figura 14).

- **Prendido del temporizador TT1 y de la salida Q1 del PLC**

Cuando se prende el temporizador TT1, se inicia el conteo del tiempo de funcionamiento de la electroválvula, la cual se vincula con Q1 (figura 14).

- **Apagado del temporizador TT1 y de la salida física Q1 del PLC**

En el mismo instante que el temporizador TT1 termina de contar el tiempo de funcionamiento de la electroválvula, el contacto cerrado t1 se abre desactivando a la bobina M1, lo cual también hace que el temporizador TT1 y Q1 se apaguen.

- **Activación y desactivación automática de la electrobomba de llenado**

La electrobomba de llenado se activará automáticamente, siempre y cuando el líquido llegue al nivel bajo, en ese instante se debe cerrar el contacto I3 del interruptor de nivel, haciendo de esta forma que se prendan el piloto amarillo y la electrobomba de llenado, los cuales se vinculan a las salidas Q3 y Q4 del PLC, respectivamente.

Cuando el líquido llegue al nivel alto, la electrobomba de llenado se desactivará automáticamente, en ese instante se debe abrir el contacto I3 del interruptor de nivel, haciendo de esta forma que se prenda el piloto rojo que se vincula a Q2 y se apaguen el piloto amarillo (Q3) y la electrobomba de llenado (Q4). Es preciso mencionar que, esta situación se dará, siempre y cuando se presione previamente el pulsador I5. Además, si se requiere desactivar la electrobomba en cualquier momento, bastará con presionar el pulsador I4.

- **Activación y desactivación manual de la electrobomba de llenado**

En cualquier momento que se requiere y sin importar en el nivel que se encuentre el líquido, se puede activar y desactivar manualmente a la electrobomba de llenado, para eso será suficiente presionar los pulsadores I6 e I1, respectivamente.

Bloques funcionales

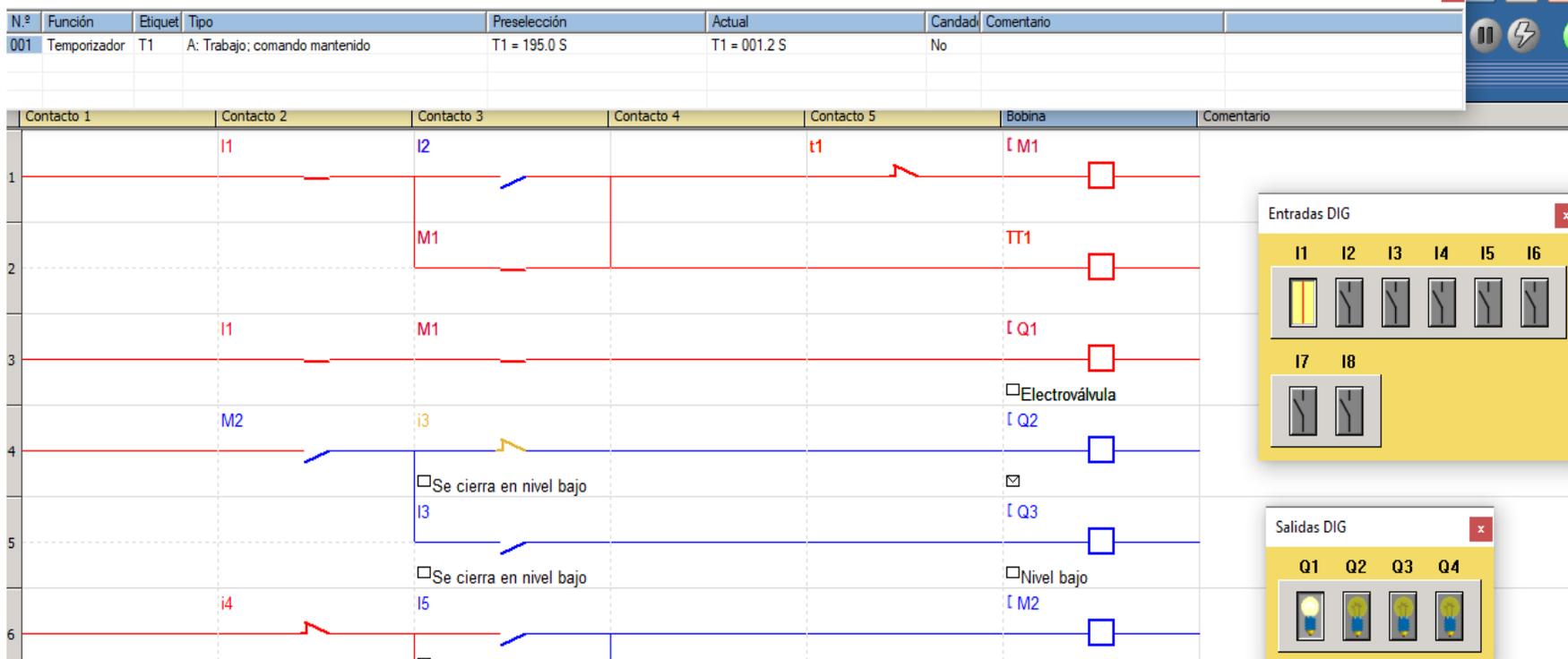


Figura 14. Prendido del temporizador TT1 y de la salida Q1 del PLC.

Fuente: Elaboración propia.

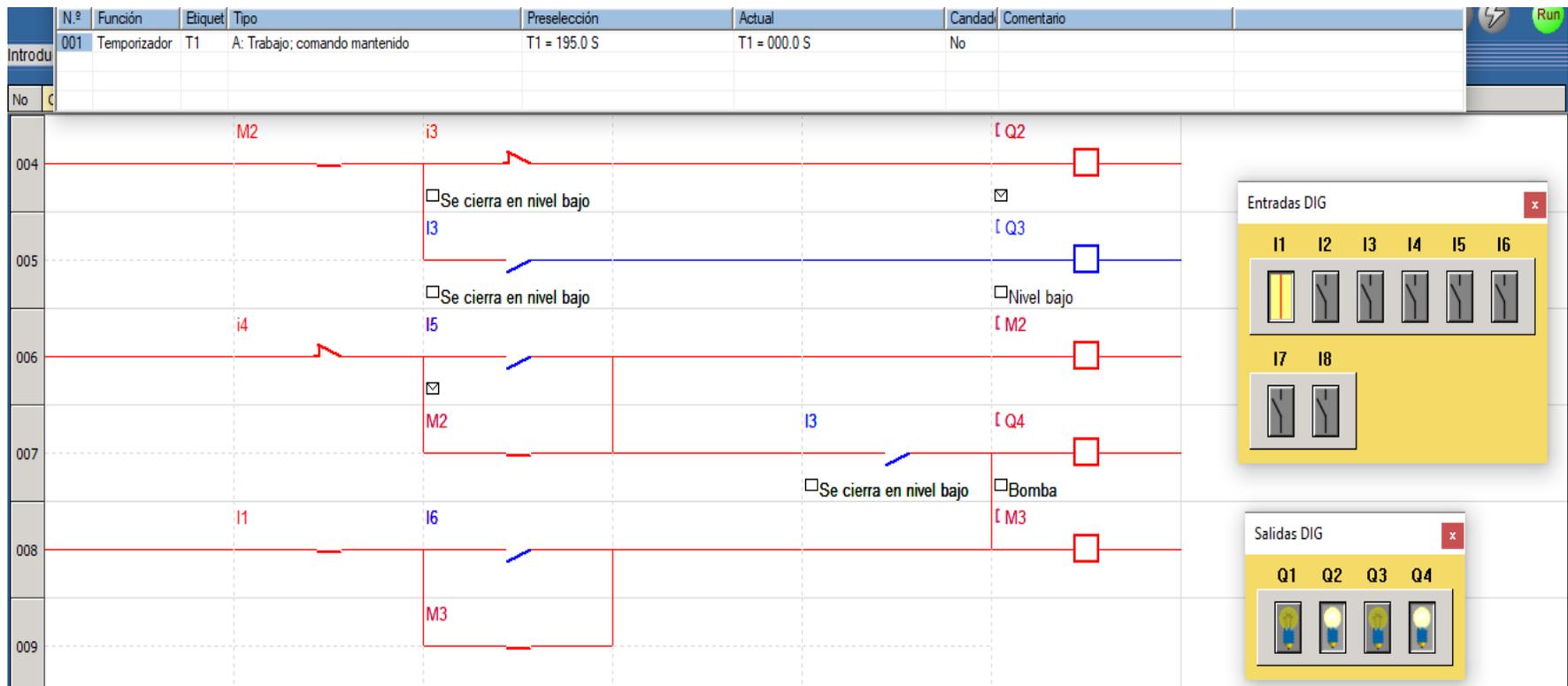


Figura 15. Activación y desactivación de la electrobomba de llenado.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Deducción de las ecuaciones que muestran la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas del PLC

Las ecuaciones que muestran la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas del PLC, representan matemáticamente al circuito de control, las mismas que se detallan a continuación:

- **Activación de la bobina M1.**

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = M1. \quad (35)$$

- **Prendido del temporizador TT1.**

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = TT1. \quad (36)$$

- **Prendido de la salida Q1.**

$$I1 * M1 = Q1. \quad (37)$$

La ecuación (35), indica que para activar a la bobina interna M1, necesariamente el contacto del pulsador I1 debe encontrarse cerrado y tiene que presionarse el pulsador I2. De esta manera, el contacto respectivo de M1, también se queda cerrado.

La ecuación (36), muestra que para prender al temporizador TT1, necesariamente los contactos I1, M1 y t1 deben encontrarse cerrados.

La ecuación (37), muestra que para prender a la salida Q1 del PLC, necesariamente los contactos I1 y M1 deben encontrarse cerrados.

Combinando las ecuaciones (35) y (37), se obtiene la ecuación (38), la cual relaciona la condición entre las entradas (I1 e I2), los componentes internos (M1 e TT1) y la salida Q1 del PLC.

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = Q1. \quad (38)$$

3.1.6. Esquema de instalación eléctrica

En relación a lo mencionado en las secciones 3.1.2 y 3.1.4, se ha elaborado el esquema de instalación eléctrica, el cual se muestra en la figura 16.

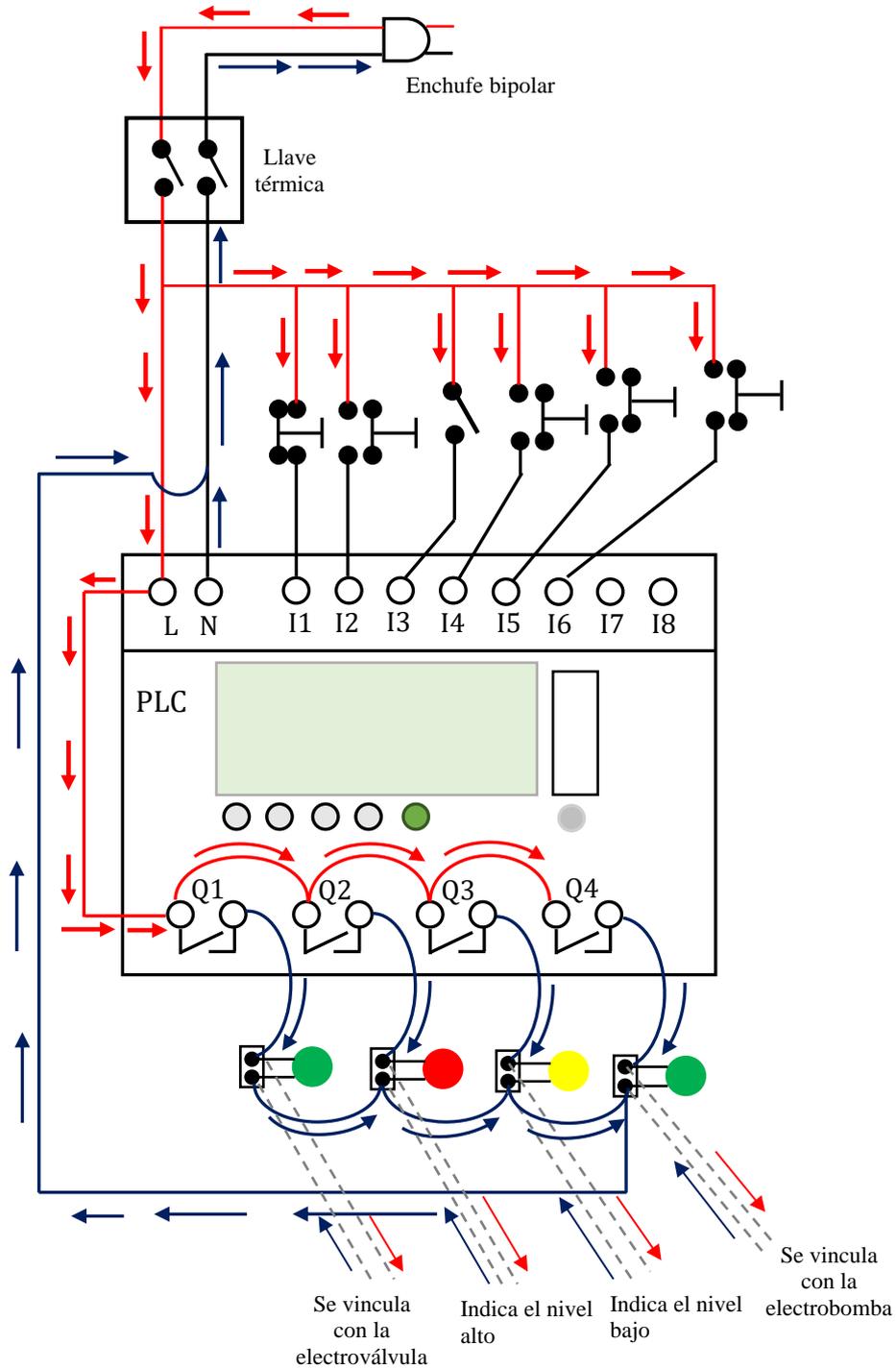


Figura 16. Esquema de instalación eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7. Construcción e instalación del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical

Teniéndose en cuenta lo indicado en las secciones 3.1.1, 3.1.2, 3.1.4 y 3.1.6, se ha construido el equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, del cual se muestran a continuación las imágenes reales de cada uno de sus componentes.



Figura 17. Tanque cilíndrico vertical, el visor y la regla graduada.

Fuente: Elaboración propia.

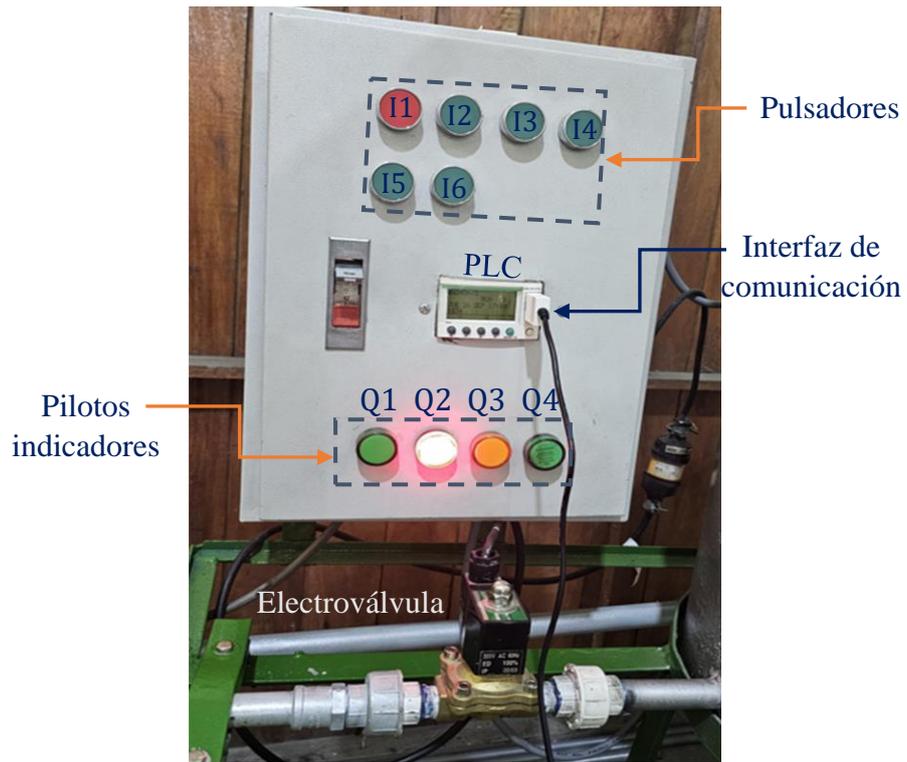


Figura 18. Sistema de control automático.

Fuente: Elaboración propia.

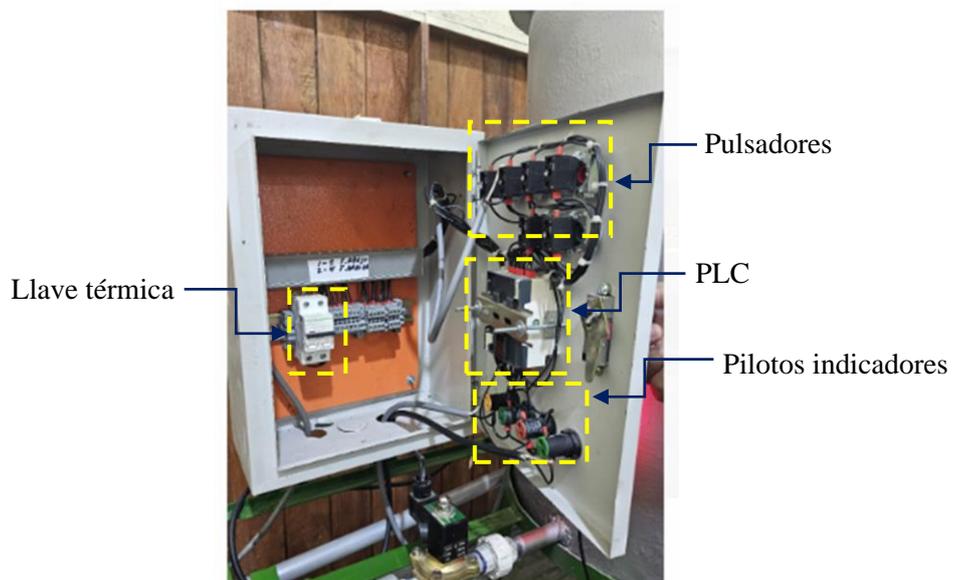


Figura 19. Vista real de la parte interior del tablero de control.

Fuente: Elaboración propia.

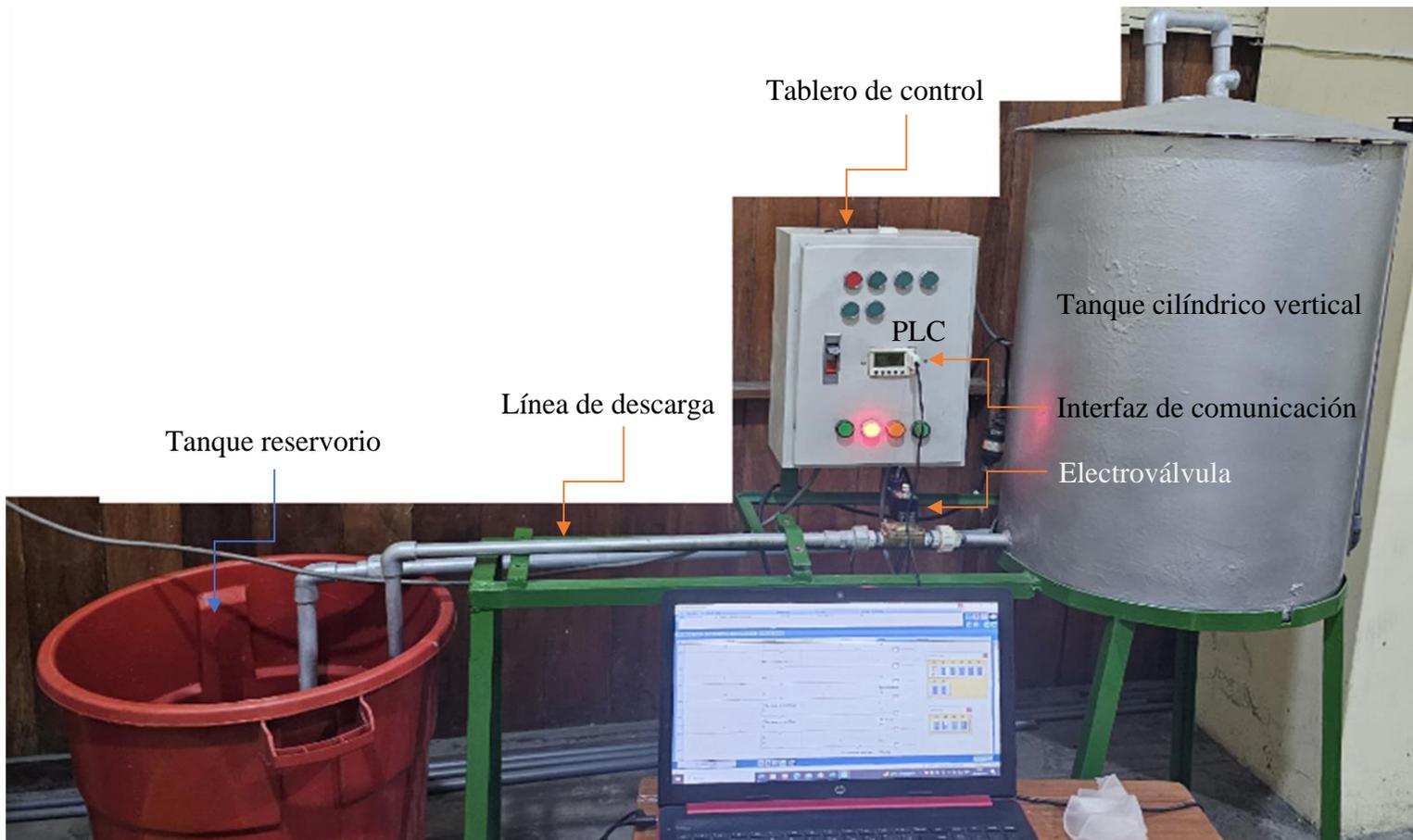


Figura 20. Vista completa del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño muestral

Para el caso del control automático, se considera como población el número total de elementos del circuito de control, lo cual se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$\text{Población} = \#B_i + \#S_F + \#T + \#C. \quad (39)$$

Donde:

#B_i : número de bobinas internas.

#S_F : número de salidas físicas.

#T : número de temporizadores.

#C : número de contactos.

En consecuencia y de acuerdo a lo indicado en la sección 3.1.4, resulta que:

$$\#B_i = 1, \#S_F = 1, \#T = 1, \#C = 4.$$

$$\text{Población} = 1 + 1 + 1 + 4 = 7.$$

Cabe mencionar, que en este caso el circuito de control, está referido específicamente al control automático de la operación de drenaje. De este modo, la población resultó igual a 7. Para la muestra, se ha tenido en cuenta los siguientes criterios:

Criterio de inclusión: se considera exclusivamente como muestra, a la salida Q1 del PLC, ya que esta salida está vinculada a la electroválvula, de la cual verificamos que su tiempo de funcionamiento sea el mismo que el programado en el temporizador del PLC.

Criterio de exclusión: se excluyen como muestra, a los elementos siguientes del circuito de control: la bobina interna M1, el temporizador TT1 y los cuatro contactos: I1, I2, M1 y t1, ya que estos elementos no están vinculados físicamente con la electroválvula.

Considerándose el drenaje de líquidos en el tanque cilíndrico vertical, como una operación de transporte de fluidos, la población está conformada por las múltiples pruebas de funcionamiento de dicho equipo, lo cual indica que es bastante grande.

Entonces, de este modo a criterio de los investigadores, se ha determinado que el tamaño de muestra lo representan las ocho (8) pruebas de funcionamiento que se han llevado a cabo en el mencionado equipo.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

En la recolección de datos, se han realizado los siguientes procedimientos que se describen a continuación:

- **Evaluación de las dimensiones del tanque cilíndrico vertical y de la tubería de la línea de descarga**

Se evaluaron los siguientes parámetros: el diámetro (D_{ITCV}) y la altura del tanque cilíndrico vertical (\mathbb{H}_{TCV}), la longitud (L_{TR}) y el diámetro (D_s) de la tubería de la línea de descarga, de los cuales se dan a conocer sus valores en la siguiente tabla.

Tabla 4. Dimensiones del tanque cilíndrico vertical y de la tubería de la línea de descarga.

D_{ITCV}	\mathbb{H}_{TCV}	L_{TR}	D_s
m	m	m	m
0.5	0.7	0.93	0.0165

Fuente: Elaboración propia.

En este procedimiento se ha empleado como instrumentos un vernier y una wincha flexómetro.

- **Evaluación del factor de fricción promedio**

Para evaluar el factor de fricción promedio (f_m), se ha hecho uso de la ecuación (13), para lo cual ha sido necesario evaluar previamente la rapidez lineal promedio (v_s) y el número de Reynolds (Re), aplicándose las ecuaciones (40) y (41), respectivamente, teniéndose en cuenta los datos que se indican en la tabla 5. La rapidez lineal promedio (v_s), se evaluó para un intervalo de altura de líquido correspondiente a la altura del tanque cilíndrico vertical, esto es: $0 \leq \mathbb{H} \leq 0.7$ m. Entonces, el número de Reynolds (Re), se evaluó con los valores correspondientes de v_s y utilizando los datos de las tablas 4 y 5.

$$v_s = \sqrt{2g(\mathbb{H} + z)}. \quad (40)$$

$$\mathbb{R}e = \frac{v_s D_s \rho}{\eta}. \quad (41)$$

Tabla 5. Cantidades requeridas para evaluar el factor de fricción promedio.

g	z	ρ	η	D_s	$\epsilon_{\text{Plástico}}$
m/s ²	m	kg/m ³	Pa.s	m	m
9.81	0.12	996	0.0008	0.0165	3.0×10^{-7}

Fuente: Elaboración propia; Estrella y Panduro, 2023, p. 48.

Tabla 6. Evaluación del factor de fricción promedio.

\mathbb{H}	v_s	$\mathbb{R}e$	f	f_m
m	m/s	Adimensional	Adimensional	Adimensional
0.7	4.0110	8.24×10^4	0.02	0.02
0.65	3.8868	7.98×10^4	0.02	
0.6	3.7585	7.72×10^4	0.02	
0.55	3.6257	7.45×10^4	0.02	
0.5	3.4877	7.16×10^4	0.02	
0.45	3.3442	6.87×10^4	0.02	
0.4	3.1941	6.56×10^4	0.02	
0.35	3.0367	6.42×10^4	0.02	
0.1	2.0776	4.27×10^4	0.02	
0.0	1.5344	3.15×10^4	0.02	

Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, si $\mathbb{H} = 0.5$ m, los cálculos para v_s , $\mathbb{R}e$ y f , fueron:

$$v_s = \sqrt{2g(\mathbb{H} + z)} = \sqrt{2(9.81)(0.5 + 0.12)} = 3.4877 \text{ m/s.}$$

$$\mathbb{R}e = \frac{v_s D_s \rho}{\eta} = \frac{(3.4877)(0.0165)(996)}{0.0008} = 7.16 \times 10^4.$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D_s/\epsilon_{\text{Plástico}})} + \frac{5.74}{\mathbb{R}e^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(0.0165/3.0 \times 10^{-7})} + \frac{5.74}{(7.16 \times 10^4)^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.02.$$

Se puede observar de la tabla 6, que el valor de f , prácticamente no cambia a través del intervalo de altura de líquido: $0 \leq \mathbb{H} \leq 0.7$ m. Por tanto, el valor promedio del factor de fricción es: $f_m = 0.02$.

- **Evaluación del factor Φ**

El factor Φ , se evalúa con la ecuación (42), tal como se muestra a continuación:

$$\Phi = C_{R(\text{Entrada})} + f_m \left(\frac{\mathbb{L}_e}{D} \right)_{EV} + f_m \left(\frac{\mathbb{L}_{TR}}{D_s} \right) + f_m \left(\frac{\mathbb{L}_e}{D} \right)_{\text{Codo}}. \quad (42)$$

Donde los valores de $C_{R(\text{Entrada})}$, $(\mathbb{L}_e/D)_{EV}$, (\mathbb{L}_{TR}/D_s) y $(\mathbb{L}_e/D)_{\text{Codo}}$, se dan a conocer en la tabla 7.

Tabla 7. Datos requeridos para la evaluación del factor Φ .

$C_{R(\text{Entrada})}$	$\left(\frac{\mathbb{L}_e}{D} \right)_{EV}$	$\left(\frac{\mathbb{L}_{TR}}{D_s} \right)$	$\left(\frac{\mathbb{L}_e}{D} \right)_{\text{Codo}}$	f_m
Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional
0.5	2060	56.364	30	0.02

Fuente: Elaboración propia.

El valor de $(\mathbb{L}_{TR}/D_s) = 56.364$, se ha obtenido mediante la división de la longitud de la tubería recta de la línea de descarga ($\mathbb{L}_{TR} = 0.93$ m) con el valor del

diámetro interior de la misma tubería ($D_s = 0.0165$ m), los mismos que se dieron a conocer en la tabla 4. Los valores de $(L_e/D)_{EV} = 2060$ y $(L_e/D)_{Codo} = 30$, se han obtenido de la tabla 1.

Por lo tanto, al hacer uso de la ecuación (42), el factor Φ resulta:

$$\Phi = 0.5 + 0.020 \times (2060 + 56.364 + 30) \cong 42.0337.$$

Es preciso dar a entender, que el líquido utilizado para las ocho (8) pruebas del equipo, fue agua pura a 25 °C, de la cual se dieron a conocer sus propiedades termofísicas: densidad (ρ) y viscosidad (η), en la tabla 5.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos, se han programado en Microsoft Excel 2023, las siguientes ecuaciones:

- Las ecuaciones (40) y (41) para evaluar la rapidez lineal promedio y el número de Reynolds en la línea descarga, respectivamente.
- La ecuación (13) para evaluar el factor de fricción, correspondiente al intervalo $0 \leq \mathbb{H} \leq 0.7$ m.
- La ecuación (42) para evaluar el factor Φ .
- La ecuación (19) para determinar el volumen inicial de líquido.
- Las ecuaciones (20) y (21) para determinar el volumen final de líquido teórico y experimental, respectivamente.
- La ecuación (23) para determinar el valor teórico de la altura final de líquido.
- La ecuación (22) para determinar el valor experimental del volumen de drenaje.
- La ecuación (34) para determinar el tiempo de funcionamiento de la electroválvula.
- La ecuación (43) para determinar el porcentaje de error del volumen de drenaje:

$$\% \text{ Error } \mathcal{V}_D = \frac{|\mathcal{V}_{D(\text{Exp})} - \mathcal{V}_{D(\text{Teo})}|}{\mathcal{V}_{D(\text{Teo})}} \times 100. \quad (43)$$

El controlador lógico programable (PLC) empleado en el presente trabajo es de la marca Schneider Electric, modelo Zelio con serie SR2B121 FU, utilizando para su programación el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2.

Para la elaboración del circuito de control, también se ha utilizado el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2, el cual se instaló en una PC con procesador Intel core i5 de octava generación, para luego transferirse desde la PC al PLC mediante la interfaz de comunicación.

3.5. Aspectos éticos

Como tesis y egresados de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, hacemos mención que nuestro trabajo de tesis es lícito y no existe plagio alguno de cualquier otra tesis o trabajo de investigación, mostrándose en forma precisa las fuentes de información empleadas en todas las bases teóricas mencionadas. En tal sentido, estamos comprometidos en respaldar la legitimidad de los resultados obtenidos en las diversas pruebas de funcionamiento que se realicen en el mencionado equipo.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 8. Resultados teóricos de las variables intervinientes.

Prueba	\mathbb{H}_i		\mathcal{V}_i		$\mathcal{V}_{D(\text{Teo})}$		$\mathcal{V}_{f(\text{Teo})}$		$\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$	
	m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm
1	0.53	53.0	0.10407	104.07	0.0200	20.0	0.08407	84.07	0.4281	42.81
2	0.425	42.5	0.08345	83.45	0.0180	18.00	0.06545	65.45	0.3333	33.33
3	0.33	33.0	0.06480	64.80	0.0150	15.00	0.04980	49.80	0.2536	25.36
4	0.254	25.4	0.04987	49.87	0.0200	20.0	0.02987	29.87	0.1521	15.21
5	0.548	54.8	0.10760	107.60	0.0200	20.0	0.08760	87.60	0.4461	46.61
6	0.44	44.0	0.08639	86.39	0.0180	18.00	0.06839	68.39	0.3483	34.83
7	0.345	34.5	0.06774	67.74	0.0150	15.00	0.05274	52.74	0.2686	26.86
8	0.27	27.0	0.05301	53.01	0.0165	16.50	0.03651	36.51	0.1860	18.60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Determinación del tiempo de funcionamiento de la electroválvula.

Prueba	\mathbb{H}_i		$\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$		$\mathcal{V}_{D(\text{Teo})}$		t_{FEV}	
	m	cm	m	cm	m ³	L	s	min
1	0.53	53.0	0.4281	42.81	0.0200	20.0	179.1	3.0
2	0.425	42.5	0.3333	33.33	0.0180	18.00	176.6	2.9
3	0.33	33.0	0.2536	25.36	0.0150	15.00	162.1	2.7
4	0.254	25.4	0.1521	15.21	0.0200	20.0	244.5	4.1
5	0.548	54.8	0.4461	46.61	0.0200	20.0	176.5	2.9
6	0.44	44.0	0.3483	34.83	0.0180	18.00	174.0	2.9
7	0.345	34.5	0.2686	26.86	0.0150	15.00	159.2	2.7
8	0.27	27.0	0.1860	18.60	0.0165	16.50	194.1	3.2

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8, se dan a conocer los resultados de las variables intervinientes: \mathcal{V}_i , $\mathcal{V}_{f(\text{Teo})}$ y $\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$. Por ejemplo, para determinar los valores de \mathcal{V}_i , $\mathcal{V}_{f(\text{Teo})}$ y $\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$, en

la cuarta prueba, se ha aplicado correspondientemente las ecuaciones (19), (20) y (23), esto es:

$$\mathcal{V}_i = \frac{\pi}{4} D_{ITCV}^2 \mathbb{H}_i = \frac{\pi}{4} (0.5)^2 (0.254) = 0.04987 \text{ m}^3 = 49.87 \text{ L.}$$

$$\mathcal{V}_{f(\text{Teo})} = \mathcal{V}_i - \mathcal{V}_{D(\text{Teo})} = 0.04987 - 0.0200 = 0.02987 \text{ m}^3 = 29.87 \text{ L.}$$

$$\mathbb{H}_{f(\text{Teo})} = \mathbb{H}_i - \frac{4}{\pi D_{ITCV}^2} \mathcal{V}_{D(\text{Teo})} = 0.254 - \frac{4}{\pi (0.5)^2} (0.0200) = 0.1521 \text{ m} = 15.21 \text{ cm.}$$

De esta misma manera, se han determinado los valores de \mathcal{V}_i , $\mathcal{V}_{f(\text{Teo})}$ y $\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$ en las demás pruebas.

En la tabla 9, se muestra los resultados del tiempo de funcionamiento de la electroválvula (t_{FEV}), en las ocho pruebas realizadas. Por ejemplo, para determinar el valor de t_{FEV} en la cuarta prueba, se ha aplicado la ecuación (34), tal como se indica a continuación:

$$t_{FEV} = \left(\frac{D_{ITCV}}{D_s} \right)^2 \sqrt{\frac{2 \left[\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}} \right)^4 \right]}{g}} \left(\sqrt{\mathbb{H}_i + z} - \sqrt{\mathbb{H}_{f(\text{Teo})} + z} \right)$$

$$\Phi = 42.0337, \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \quad D_{ITCV} = 0.5 \text{ m}, \quad D_s = 0.0165 \text{ m}, \quad z = 0.12 \text{ m.}$$

$$t_{FEV} = \left(\frac{0.5}{0.0165} \right)^2 \sqrt{\frac{2 \left[42.0337 + 1 - \left(\frac{0.0165}{0.5} \right)^4 \right]}{9.81}} \left(\sqrt{0.254 + 0.12} - \sqrt{0.1521 + 0.12} \right)$$

$$t_{FEV} = 244.5 \text{ s} = 4.1 \text{ min.}$$

Del mismo modo, se han determinado los valores de t_{FEV} en las otras pruebas realizadas.

Tabla 10. Resultados teóricos y experimentales de la altura final de líquido.

Prueba	$\mathbb{H}_{f(\text{Teo})}$		$\mathbb{H}_{f(\text{Exp})}$	
	m	cm	m	cm
1	0.4281	42.81	0.425	42.5
2	0.3333	33.33	0.330	33.0
3	0.2536	25.36	0.254	25.4
4	0.1521	15.21	0.157	15.7
5	0.4461	46.61	0.442	44.2
6	0.3483	34.83	0.345	34.5
7	0.2686	26.86	0.270	27.0
8	0.1860	18.60	0.190	19.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados teóricos y experimentales del volumen final de líquido.

Prueba	$\mathcal{V}_{f(\text{Teo})}$		$\mathcal{V}_{f(\text{Exp})}$	
	m ³	L	m ³	L
1	0.08407	84.07	0.08345	83.45
2	0.06545	65.45	0.06480	64.80
3	0.04980	49.80	0.04987	49.87
4	0.02987	29.87	0.03083	30.83
5	0.08760	87.60	0.08679	86.79
6	0.06839	68.39	0.06774	67.74
7	0.05274	52.74	0.05301	53.01
8	0.03651	36.51	0.03731	37.31

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener los valores de $\mathbb{H}_{f(\text{Exp})}$, que se dan a conocer en la tabla 10, se ha hecho una inspección al visor con regla graduada al culminar la operación de drenaje, lo cual también ha servido para determinar los valores de $\mathcal{V}_{f(\text{Exp})}$. En la tabla 11, se indican valores de $\mathcal{V}_{f(\text{Exp})}$, los cuales se han obtenido mediante la aplicación de la ecuación (21).

Por ejemplo, para obtener el valor de $\mathcal{V}_{f(\text{Exp})}$ en la cuarta prueba, el procedimiento fue el siguiente:

$$\mathcal{V}_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{4} D_{\text{ITCV}}^2 \mathbb{H}_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{4} (0.5)^2 (0.157) = 0.03083 \text{ m}^3 = 30.83 \text{ L.}$$

Tabla 12. Comparación de resultados para el volumen de drenaje.

Prueba	$\mathcal{V}_{D(\text{Teo})}$		$\mathcal{V}_{D(\text{Exp})}$		% Error \mathcal{V}_D
	m ³	L	m ³	L	
1	0.0200	20.0	0.02062	20.62	3.08 %
2	0.0180	18.00	0.01865	18.65	3.63 %
3	0.0150	15.00	0.01492	14.92	0.52 %
4	0.0200	20.0	0.01905	19.05	4.77 %
5	0.0200	20.0	0.02081	20.81	4.07 %
6	0.0180	18.00	0.01865	18.65	3.63 %
7	0.0150	15.00	0.01473	14.73	1.83 %
8	0.0165	16.50	0.01571	15.71	4.80 %

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de $\mathcal{V}_{D(\text{Exp})}$ en cada una de las ocho pruebas realizadas, se han determinado aplicándose la ecuación (22), los cuales se dan a conocer en la tabla 12. Por ejemplo, para determinar el valor de $\mathcal{V}_{D(\text{Exp})}$ en la prueba 4, el cálculo fue el siguiente:

$$\mathcal{V}_{D(\text{Exp})} = \mathcal{V}_i - \mathcal{V}_{f(\text{Exp})} = 0.04987 - 0.03083 = 0.01905 \text{ m}^3 = 19.05 \text{ L.}$$

Asimismo, en la tabla 12 se indica el porcentaje de error del volumen de drenaje (% Error \mathcal{V}_D), el cual se ha obtenido mediante la ecuación (43). Entonces, en la cuarta prueba, el cálculo para obtener el valor del % Error \mathcal{V}_D fue el siguiente:

$$\% \text{ Error } \mathcal{V}_D = \frac{|\mathcal{V}_{D(\text{Exp})} - \mathcal{V}_{D(\text{Teo})}|}{\mathcal{V}_{D(\text{Teo})}} \times 100 = \frac{|0.01905 - 0.0200|}{0.0200} \times 100 = 4.77 \%.$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

En la tabla 12, se puede notar que el mínimo y máximo porcentaje de error obtenido para el volumen de drenaje, fue: 0.52 % y 4.8 %, los cuales les corresponden a las pruebas 3 y 8, respectivamente.

Estrella y Panduro (2023, p. 58), también efectuaron ocho pruebas en un equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, consiguiendo como mínimo (1.15 %) y máximo (2.02 %) porcentaje de error en relación al volumen de drenaje. De la misma forma, Dávila y Grández (2024, p. 49) han llevado a cabo cinco pruebas de vaciado en un tanque cilíndrico horizontal, de lo cual alcanzaron los siguientes resultados con respecto al volumen final de líquido: el mínimo y máximo fueron 0.205 % y 1.384 %. De este modo, al confrontar estos resultados con los que se dan a conocer en la tabla 12 (mínimo = 0.52 % y máximo = 4.8 %); hacemos mención que los resultados obtenidos en el presente trabajo dan una fiabilidad mayor al 95 %, lo cual demuestra que la ecuación (34) deducida en la sección 3.1.3, puede ser considerada como un modelo matemático predictivo, mediante el cual se puede evaluar el tiempo de funcionamiento de una electroválvula, la misma que debe estar instalada en la línea de descarga de un tanque cilíndrico vertical, para que de esta manera se drene de dicho tanque una determinada cantidad de líquido. Asimismo, en las ocho pruebas realizadas, ha sido suficiente ingresar los valores de la altura inicial de líquido y del volumen de drenaje teórico, para que se calculen automáticamente los valores teóricos del volumen final, la altura final y el tiempo de funcionamiento de la electroválvula, lo cual se debe a que se programaron en Microsoft Excel 2023 todas las ecuaciones mediante las cuales se relacionan las variables independientes, las variables intervinientes y la variable dependiente de la operación de drenaje.

Además, al tener conectado el PLC con una PC mediante la interfaz de comunicación, se ha podido ver en las ocho pruebas realizadas, la condición de todos los elementos del circuito de control, comprobándose de esta forma las ecuaciones lógicas deducidas en la sección 3.1.5. Por ejemplo, para que se prenda la salida Q1 la cual se vinculó con la electroválvula, anticipadamente se tiene que presionar el pulsador I2 y los contactos I1, M1 y t1 deben encontrarse cerrados, lo cual también indica que existe una relación directa entre la condición del contacto M1 con la condición de la salida Q1.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- En la sección 1.3.2, se ha deducido la ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical, la cual es correspondiente a la igualdad (23), cumpliéndose de este modo con el primer objetivo específico y al mismo tiempo probándose la primera hipótesis específica.
- Al deducirse la ecuación (34), se ha podido comprobar de que el tiempo de funcionamiento de la electroválvula que se encuentra instalada en la línea de descarga del tanque cilíndrico vertical, está en función de las alturas inicial y final de líquido en dicho tanque. De esta forma se logró el segundo objetivo específico y a su vez se ha demostrado la segunda hipótesis específica.
- En la sección 3.1.4, se ha elaborado el circuito de control, el mismo que hizo posible que la operación de drenaje en el tanque cilíndrico vertical se lleve a cabo de forma automática y confiable. También, como la electroválvula estuvo vinculada a una salida del PLC y este a su vez estuvo conectado a una PC mediante la interfaz de comunicación, es que se pudo prender la electroválvula desde la PC simplemente con hacer un clic. En consecuencia, se puede decir que se ha logrado el tercer objetivo específico y al mismo tiempo se ha probado la tercera hipótesis específica.
- En la sección 3.1.5, se han deducido las ecuaciones que muestran la condición entre las entradas (I1 e I2), los componentes internos (M1 y TT1) y la salida física (Q1) del PLC, las cuales han permitido llegar a la siguiente conclusión: para prender a la electroválvula y al temporizador del PLC, previamente se tiene que haber presionado el pulsador I2 y necesariamente los contactos I1, M1 y t1 deben encontrarse cerrados. Por tanto, se puede decir que se ha cumplido con el cuarto objetivo específico y simultáneamente se ha probado la cuarta hipótesis específica.
- Por todo lo mencionado en los párrafos precedentes, manifestamos que se ha concluido el presente trabajo de tesis, cumpliéndose de esta manera con el objetivo general y comprobándose la hipótesis general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la implementación del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la FIQ-UNAP, mediante la construcción de otros equipos automatizados tales como: intercambiador de doble tubo, secador de granos y columna de destilación. Esto a su vez permitiera mejorar las condiciones de aprendizaje en los cursos de transferencia de calor y transferencia de masa.
- Se recomienda aplicar la ecuación (19) para determinar el volumen inicial de líquido en el tanque cilíndrico vertical, siendo necesario que se determine previamente la altura inicial de líquido.
- La ecuación (21), se recomienda para determinar el valor teórico del volumen final de líquido en el tanque cilíndrico vertical, para lo cual es necesario conocer el volumen inicial de líquido y el volumen de drenaje.
- La ecuación (23), se recomienda para determinar el valor teórico de la altura final de líquido en el tanque cilíndrico vertical, para lo cual es necesario conocer la altura inicial de líquido y el volumen de drenaje.
- Únicamente, para la operación de drenaje de un líquido en un tanque cilíndrico vertical, el cual tiene una línea de descarga en la que se encuentra instalada una electroválvula, se recomienda utilizar la ecuación (34) para determinar el tiempo de funcionamiento de la electroválvula y de esta manera se drene del tanque una determinada cantidad de líquido.
- Se recomienda utilizar la vestimenta apropiada al momento de realizar las pruebas de funcionamiento del equipo y evitar tocar los componentes eléctricos con las manos mojadas.
- Se recomienda hacer una revisión periódica de todos los elementos del sistema de control (PLC, electroválvula, llave térmica, conexiones eléctricas, pulsadores y pilotos indicadores), esto con el propósito de que no ocurran eventualidades que puedan modificar el funcionamiento de la electroválvula y el PLC.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

- BRAVO, Steeven. Cálculo de pérdidas de cargas de diferentes accesorios utilizados en tuberías a presión en el Laboratorio de Hidráulica UNESUM. Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil. Manabí, Ecuador: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas, Carrera de Ingeniería Civil, 2020. pp. 14-16.
- CARBAJAL, Sergio y SÁENZ, Aquiles. Diseño y construcción de un equipo para determinar la relación de longitud equivalente en diferentes tipos de válvulas y accesorios. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. 5-12.
- CHÁVEZ, Raul y MORALES, Víctor. Rediseño, implementación y control de los sistemas de bombeo: sistema de presión constante, sistema de sumidero y sistema de aguas negras de hipermercados TOTTUS S.A. - Tusilagos. Tesis para optar el título de profesional de Ingeniero Mecatrónico. Piura, Perú: Universidad Nacional de Piura, Facultad de Ingeniería Industrial, Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica, 2021. 65 p.
- CHONG, Pablo y FERREYRA, Juan. Construcción e instalación de un prototipo para llenado de botellones con agua y su implementación con un controlador lógico programable. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. 12 p.
- DÁVILA, Leonardo y GRÁNDEZ, David. Implementación de un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2024. pp. xi, 1-55.

- ESPINOZA, Janeth y PEZO, Arlington. Construcción e instalación de un equipo para determinar la relación entre la altura dinámica y el caudal en electrobombas periféricas. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. 4-6, 12.
- ESTRELLA, Naomi y PANDURO, Jahel. Mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. xi, 1-60.
- GÓMEZ, Hadryan y HUAYAS, Milagros. Mejoramiento del control automático de dos equipos del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana-2023. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2024. pp. 5-7, 17-18.
- HONORIO, José y MOLINA, Jhonatan. Diseño, construcción e instalación de un equipo para el estudio del control automático del nivel de líquido en dos tanques. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. 8-9, 17-18.
- LÓPEZ, Juan. Diseño, construcción y control de una planta de llenado y vaciado de tanques. Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial. Jaén, España: Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2018. pp. 1-39.
- RODRÍGUEZ, Julián; CERDÁ, Luis y BEZOS, Roberto. Automatismos Industriales. 2a. ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2022. pp. 7, 313. ISBN 13: 978-84-1366-161-2.

- SARAVIA, Edgar. Diseño de un módulo educativo para mejorar la enseñanza en el área de control y automatización de la Universidad de Ciencias y Humanidades. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico con mención en Telecomunicaciones. Lima, Perú: Universidad de Ciencias y Humanidades, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica con mención en Telecomunicaciones, 2019. 15 p.
- VENERO, Armando. Análisis Matemático 1. 2a. ed. digital. Lima, Perú: Ediciones Gemar, E.I.R.L, 2023. pp. 392-393
ISBN DIGITAL: 9786124834097.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿Cuáles serían los componentes, con los que debe contar el equipo automatizado para realizar adecuadamente el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Es posible deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical? • ¿Es posible deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical? • ¿Cuál es el circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical? • ¿Es posible deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico? 	<p>Objetivo general Diseñar y construir un equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical. • Deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical. • Elaborar el circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical. • Deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico. 	<p>Hipótesis general El equipo automatizado para realizar adecuadamente el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, debe estar conformado por los siguientes componentes: un controlador lógico programable, una interfaz de comunicación, una electroválvula, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sí, es posible deducir una ecuación entre la altura final, la altura inicial y el volumen de drenaje en un tanque cilíndrico vertical. • Sí, es posible deducir una ecuación entre el tiempo de funcionamiento de la electroválvula con las alturas inicial y final de líquido en un tanque cilíndrico vertical. • El circuito de control que hace posible la automatización del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, debe ser un diagrama tipo ladder, el mismo que debe elaborarse haciendo uso del software de programación del controlador lógico. • Sí, es posible deducir las ecuaciones que muestren la condición entre las entradas, los componentes internos y las salidas físicas de un controlador lógico. 	<p>Variables independientes En el control automático I1 e I2: condición de las entradas del PLC que se vinculan con los pulsadores I1(NC) e I2 (NA).</p> <p>En el drenaje H_i: altura inicial de líquido. V_D: volumen de drenaje.</p> <p>Variables intervinientes En el control automático M1: condición de la bobina M1. TT1: condición del temporizador TT1.</p> <p>En el drenaje V_i: volumen inicial de líquido. H_f: altura final de líquido. V_f: volumen final de líquido.</p>	<p>Abierto: 0 Cerrado: 1</p> <p>m, cm. m³, L.</p> <p>Apagado: 0 Prendido: 1</p> <p>m³, L. m, cm. m³, L.</p> <p>Apagado: 0 Prendido: 1</p> <p>s, min.</p>	<p>Tipo de investigación La presente investigación tiene enfoque cuantitativo, es del tipo aplicada con diseño correlacional.</p> <p>Población En el control automático Estuvo conformada por la cantidad total de elementos del circuito de control, lo cual resultó igual a siete (7).</p> <p>En el drenaje Lo representan las múltiples pruebas de funcionamiento que se pueden llevar a cabo en el equipo.</p> <p>Muestra En el control automático Se consideró únicamente como muestra, a la salida física Q1 del PLC, debido a que está salida se vincula a la electroválvula.</p> <p>En el drenaje El tamaño de muestra fue igual a las ocho (8) pruebas de funcionamiento que se realizaron en el equipo.</p>

Anexo 2. Manual de instrucciones del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.

En la figura A1, se puede observar la vista real del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical, el cual está conformado por los componentes siguientes: un tanque cilíndrico vertical, un visor con regla graduada, un controlador lógico programable (PLC), una electroválvula, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y la llave térmica con su enchufe bipolar. El controlador lógico, se programa haciendo uso del software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2 y mediante una interfaz de comunicación se le transfiere información desde una PC. Los pulsadores rojo y verde, se representan por las entradas I1 e I2 del PLC, respectivamente. El piloto indicador, se representa por la salida Q1 del PLC, ya que tiene la función de mostrar si la electroválvula se encuentra prendida o apagada (véase también las figuras A1, A2, A3 y A4).

Para drenar una determinada cantidad de volumen de líquido en el tanque cilíndrico vertical, el procedimiento es el siguiente:

- Primeramente, se debe hacer una inspección al visor (figura A2) para determinar la altura inicial de líquido. Este valor se debe escribir en cm en la celda C10 de la hoja de cálculo y automáticamente se debe obtener el respectivo valor en m en la celda B10. En consecuencia, mediante la ecuación **(19)**, se obtiene de forma automática el valor del volumen inicial de líquido en la celda D10 (en m^3), lo cual se transforma a L en la celda E10 (figura A5).
- A continuación, se debe escribir en la celda G10, el valor del volumen de drenaje en L, lo cual se transforma a m^3 en la celda F1 y mediante las ecuaciones **(20)**, **(23)** y **(34)** hace posible que se obtengan los valores teóricos del volumen final de líquido (en m^3 en la celda H10), de la altura final de líquido (en m en la celda J10) y del tiempo de funcionamiento de la electroválvula (en s en la celda B15), respectivamente. También, dichos valores se transforman a L en la celda I10, cm en la celda K10 y min en la celda C15, respectivamente (figura A5).
- Para determinar el valor experimental de la altura final de líquido, se debe hacer nuevamente una inspección al visor del tanque cilíndrico vertical (figura A2). Este valor se debe escribir en la celda E15 en cm y de esta forma se determina el valor

correspondiente en m en la celda D15. Seguidamente, se determinan automáticamente mediante las ecuaciones (21) y (22) los valores experimentales del volumen final de líquido (en m³ en la celda F15) y del volumen de drenaje (en m³ en la celda H15). Asimismo, mediante la ecuación (43) se determina el porcentaje de error del volumen de drenaje en la celda J15 (figura A5).

Para tener comodidad y no estar llenando el tanque de forma manual, es que se ha instalado una línea de llenado, la cual está conformada por una electrobomba, accesorios (uniones universales, codos y adaptadores) y tramos de tubería recta. Para eso también se ha colocado dentro del tanque un interruptor de nivel, el mismo que se conecta a la entrada I3 del PLC; es decir, si el líquido llega al nivel bajo, el contacto de I3 se cierra y permanece así hasta que el líquido llegue al nivel alto. Dichos niveles se indican mediante los pilotos amarillo y rojo, los cuales se representan por las salidas Q3 y Q2 del PLC, respectivamente. Esto indica, que cuando el líquido llega al nivel bajo, automáticamente se deben prender la electrobomba y el piloto amarillo (Q3), los cuales deben permanecer así hasta que el líquido llegue al nivel alto. El prendido o apagado de la electrobomba, lo indica el piloto que representa a la salida Q4 del PLC. Del mismo modo, cuando el líquido llega al nivel alto, automáticamente se debe prender el piloto rojo (Q2) y apagarse la electrobomba y el piloto amarillo (Q3). Cabe mencionar, que esta situación se dará siempre y cuando se presione el pulsador I5. En es caso, el pulsador I4 tiene la función de apagar a la electrobomba (figuras A1, A2, A3 y A4).

Si en caso el operador requiere prender y apagar la electrobomba en cualquier momento, puede presionar los pulsadores I6 e I1, respectivamente. De esta manera, es que se trata de utilizar las cuatro salidas físicas del PLC, lo cual optimiza su uso.

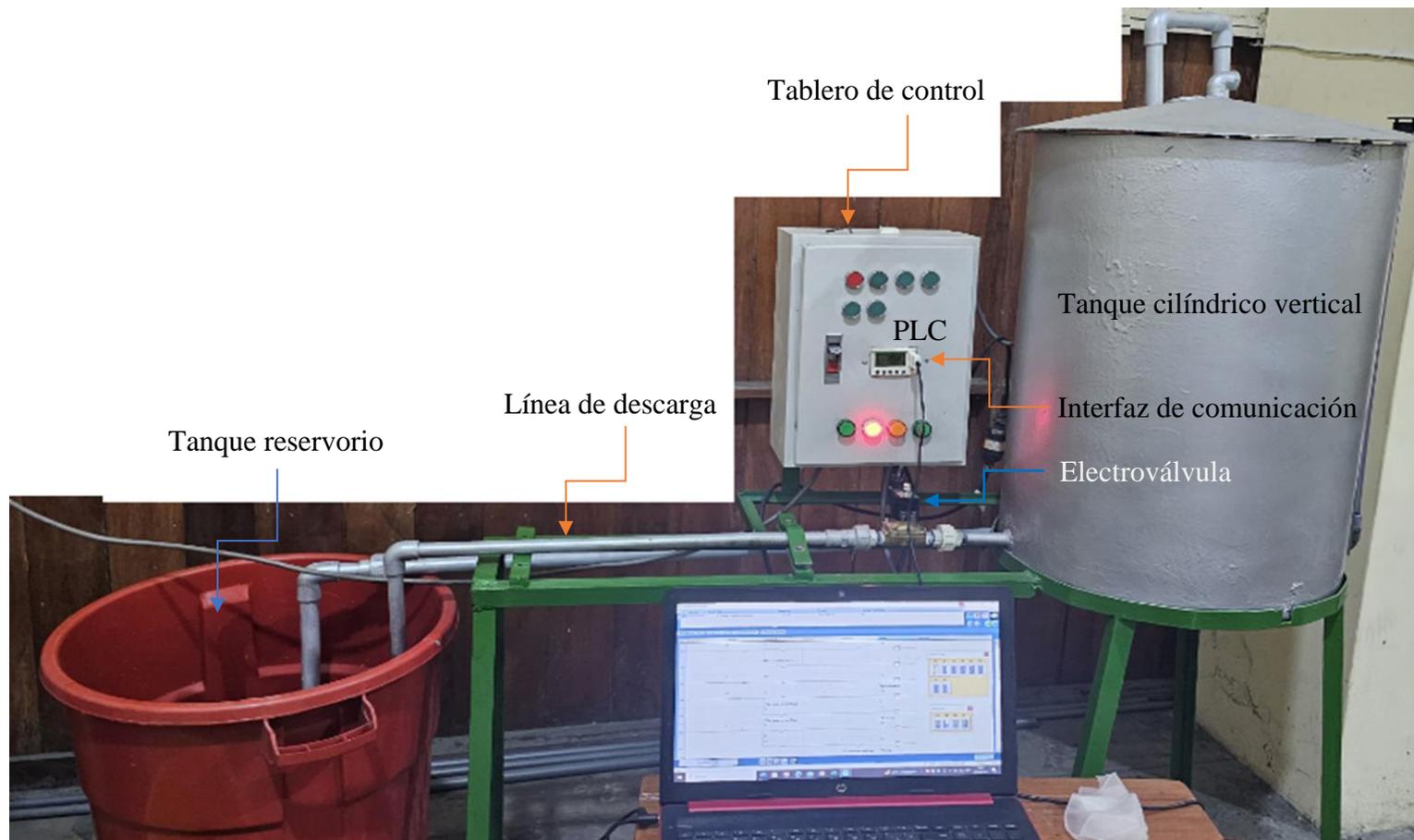


Figura A1. Vista completa del equipo automatizado para el estudio del drenaje de líquidos en un tanque cilíndrico vertical.



Figura A2. Tanque cilíndrico vertical, el visor y la regla graduada.

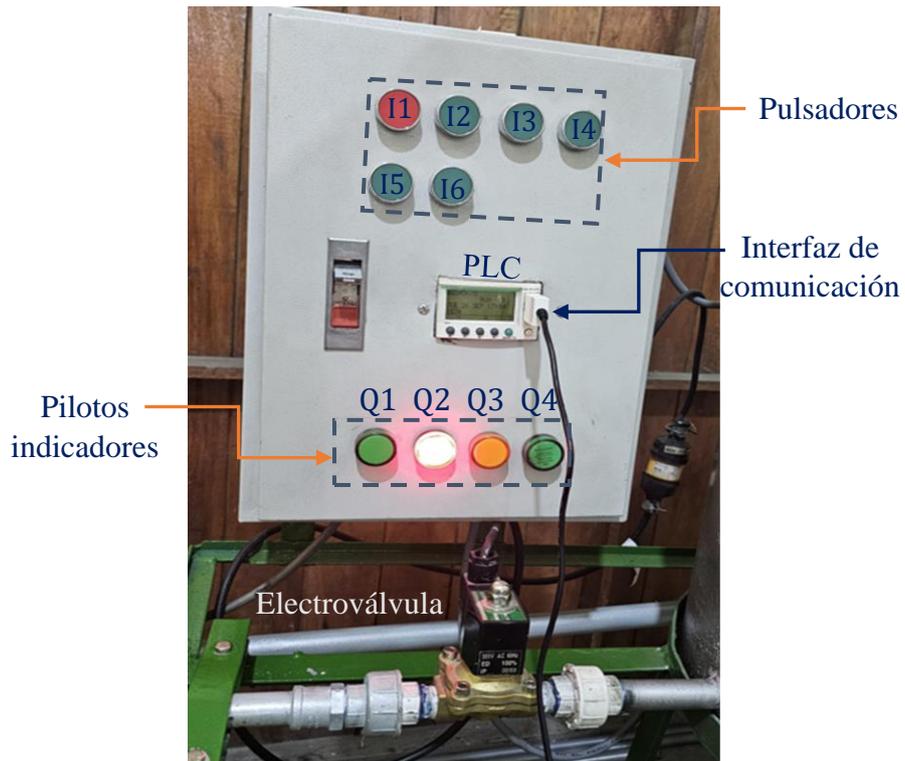


Figura A3. Sistema de control automático.

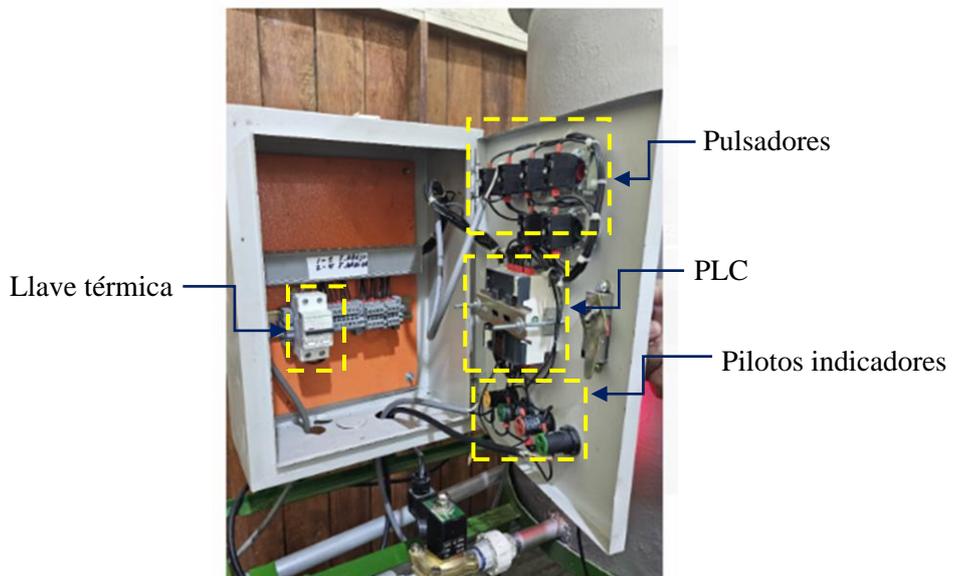


Figura A4. Parte interior del tablero de control.

B15 $=((2*(K6+1-((E6/B6)^4))/L6)^{0.5})*((B6/E6)^2)*(((B10+M6)^{0.5})-((J10+M6)^{0.5}))$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CILÍNDRICO VERTICAL													
	D_{ITCV}	H_{ITCV}	L_{TR}	D_s	$C_{R(Entrada)}$	$(L_e/D)_{Codo}$	$(L_e/D)_{EV}$	L_{TR}/D_s	f_m	Φ	g	z	
	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m	
	0.5	0.7	0.930	0.0165	0.5	30	2060	56.364	0.0199	42.0337	9.81	0.12	
	H_i	V_i	$V_{D(Teo)}$	$V_{f(Teo)}$	$H_{f(Teo)}$	$V_i = \frac{\pi}{4} D_{ITCV}^2 H_i \quad (19)$							
	m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	$V_{f(Teo)} = V_i - V_{D(Teo)} \quad (20)$		
	0.33	33	0.06480	64.80	0.0150	15.0000	0.04980	49.80	0.2536	25.36			
	t_{FEV}	$H_{f(Exp)}$	$V_{f(Exp)}$	$V_{D(Exp)}$	% Error V_D	$H_{f(Teo)} = H_i - \frac{4}{\pi D_{ITCV}^2} V_{D(Teo)} \quad (23)$							
	s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L	$\% \text{ Error } V_D = \frac{ V_{D(Exp)} - V_{D(Teo)} }{V_{D(Teo)}} \times 100 \quad (43)$				
	162.1	2.7	0.2540	25.40	0.04987	49.87	0.01492	14.923	0.52%				
	$t_{FEV} = \left(\frac{D_{ITCV}}{D_s}\right)^2 \sqrt{\frac{2 \left[\Phi + 1 - \left(\frac{D_s}{D_{ITCV}}\right)^4\right]}{g}} \left(\sqrt{H_i + z} - \sqrt{H_{f(Teo)} + z}\right) \quad (34)$					$V_{f(Exp)} = \frac{\pi}{4} D_{ITCV}^2 H_{f(Exp)} \quad (21)$			$V_{D(Exp)} = V_i - V_{f(Exp)} \quad (22)$				
	$\Phi = C_{R(Entrada)} + f_m \left(\frac{L_e}{D}\right)_{EV} + f_m \left(\frac{L_{TR}}{D_{TR}}\right) + f_m \left(\frac{L_e}{D}\right)_{Codo}$												

Prueba 1 Prueba 2 **Prueba 3** Prueba 4 Prueba 5 Prueba 6 Prueba 7 Prueba 8

Figura A5. Hoja de cálculo para la determinación del tiempo de drenaje en un tanque cilíndrico vertical.

Anexo 3. Especificaciones técnicas de los componentes del sistema de control.

Electroválvula

Marca: KLQD.

Modelo: 2W160-15-S-V.AC220.

Voltaje: 220 VAC.

Presión de fluido: 0 a 1.0 Mpa.

PLC

Marca: Schneider Electric.

Modelo: Zelio SR2 B121FU.

Alimentación: 100 – 240 VCA.

Entradas digitales = 8 (I1, ..., I8).

Salidas digitales = 4 (Q1, ..., Q4/relé de 8 A).

Llave térmica

Marca: Schneider Electric.

Amperaje: 2×16 A.