



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO
PARA EL LLENADO Y VACIADO DE UN LÍQUIDO
EN UN TANQUE CILÍNDRICO HORIZONTAL**

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

PRESENTADO POR:

**LEONARDO MYKEL DÁVILA RENGIFO
DAVID GRÁNDEZ NORIEGA**

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° 009-CGT-FIQ-UNAP-2024



En Iquitos, en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Química, a los 24 días del mes de MAYO de 2024, a horas 4: pm, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL LLENADO Y VACIADO DE UN LÍQUIDO EN UN TANQUE CILÍNDRICO HORIZONTAL"**, aprobado con Resolución Decanal N° 138-2024-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Leonardo Mykel Dávila Rengifo y David Grández Noriega**, 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° 067-2024-FIQ-UNAP está integrado por:

- | | |
|--|------------|
| Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr. | Presidente |
| Lic. ARTURO SECLÉN MEDINA, Dr. | 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 4:56 pm se dio por terminado el acto de SUSTENTACIÓN

Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.
Presidente de Jurado

Lic. ARTURO SECLÉN MEDINA, Dr.
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. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.
Presidente de Jurado



.....
Lic. ARTURO SECLÉN MEDINA, Dr.
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

NOMBRE DEL TRABAJO

FIQ_TESIS_DAVILA RENGIFO_GRANDEZ NORIEGA.pdf

AUTOR

DAVILA RENGIFO / GRANDEZ NORIEGA

RECUENTO DE PALABRAS

13874 Words

RECUENTO DE CARACTERES

66780 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

58 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.6MB

FECHA DE ENTREGA

Jun 14, 2024 12:37 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jun 14, 2024 12:38 PM GMT-5

● 24% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 22% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 21% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por ser quien me da sabiduría y capacidad, virtudes que me forjaron a poder desarrollar y culminar la tesis a pesar de los obstáculos que se me presentó.

En segundo lugar, a mis padres por los ejemplos de perseverancia que me enseñaron y que a su vez me ayudaron mucho a no rendirme, tener esa valentía para poder terminar la tesis, es por ello que se los dedico. ¡Están siempre en mi corazón!

En tercer lugar, a mi hija por ser el motivo que me impulsa a seguir luchando día tras día, esta motivación me lleva a cumplir todas mis metas propuestas como persona y como profesional porque anhelo darle un estilo de vida adecuada con buena enseñanza y sobre todo sabiduría a pesar de las circunstancias que se me presenta en la vida, sigo adelante con paso firme hasta decir lo logré.

Leonardo Mykel Dávila Rengifo

A mi familia que está conformado por mi madre y mi hermana que siempre estuvieron allí brindándome su apoyo moral y emocional, para poder lograr mis objetivos y crecer profesionalmente.

Asimismo, a los catedráticos que me apoyaron en todo este proceso y tuvieron la capacidad de poder enseñarme con paciencia y entrega los conocimientos básicos de lo extenso que es la rama de la Ingeniería Química.

David Grández Noriega

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios por darme un día más de vida lleno de salud para poder lograr mis metas establecidas y a su vez por ser mi guía en mi caminar permitiéndome llegar a este punto anhelado que marcará un antecedente muy importante en mi desarrollo como profesional.

En segundo lugar, a mis padres porque son el sostén de haber forjado en mi a ser una gran persona a consecuencia de los buenos valores que me enseñaron desde muy pequeño, muchos de los logros obtenidos son gracias a ellos por el apoyo incondicional que me dieron, confiaron en mi como persona y como profesional.

En tercer lugar, agradezco a mis asesores por ser una pieza muy importante en el desarrollo y armado de esta tesis debido a los conocimientos que ellos poseen, conocimientos que me ayudaron a sostenerme firmemente para poder culminar la tesis y decir lo logramos. ¡Muchas gracias!

En cuarto lugar, a mi facultad y a los docentes que me enseñaron, gracias a ellos tengo los conocimientos necesarios para poder desarrollarme como profesional y ser competitivo en el ámbito laboral

Leonardo Mykel Dávila Rengifo

Agradezco a mi familia por depositar su confianza en mi persona y enseñarme que los obstáculos son pasajeros, pero los logros están para siempre.

Mi más profundo agradecimiento a mis profesores, amigos y aquellas personas que me apoyaron en todo momento en el proceso de elaboración de mi tesis.

David Grández Noriega

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 general de balance de masa para procesos no reactivos	6
1.2.2. Relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal	7
1.2.3. Nivel inicial de líquido	9
1.2.4. Volumen inicial de líquido	9
1.2.5. Tiempo de llenado del tanque cilíndrico horizontal	9
1.2.6. Tiempo de vaciado del tanque cilíndrico horizontal	10
1.2.7. Nivel final de líquido	10
1.2.8. Volumen final de líquido	10
1.3. Definición de términos básicos	11
1.3.1. Sistema de control automático	11
1.3.2. Relé programable	11
1.3.3. Diagrama ladder o lógica de contactos	14
1.3.4. Temporizadores	15
1.3.5. Caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal	15
1.3.6. Caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal	15
1.3.7. Variables de control automático	15
1.3.8. Enclavamiento o retención	17
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	19
2.1. Formulación de la hipótesis	19
2.2. Variables y su operacionalización	19

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	24
3.1. Tipo y diseño	24
3.1.1. Equipo para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo en un tanque cilíndrico horizontal, antes de la implementación del sistema automatizado	26
3.1.2. Propuesta para la implementación de un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	29
3.1.3. Elaboración del diagrama ladder para la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	31
3.1.4. Orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable	35
3.1.5. Relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de las salidas físicas del relé programable	36
3.1.6. Implementación del sistema automatizado en el equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	37
3.2. Diseño muestral	42
3.3. Procedimientos de recolección de datos	43
3.4. Procesamiento y análisis de datos	45
3.5. Aspectos éticos	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	46
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	53
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	54
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	56
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	57
ANEXOS	59
Anexo 1. Matriz de consistencia	60
Anexo 2. Hoja de cálculo para la operación de llenado	61
Anexo 3. Hoja de cálculo para la operación de vaciado	62
Anexo 4. Vistas de las pruebas de funcionamiento del sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	63
Anexo 5. Especificaciones técnicas de los componentes principales del sistema automatizado	65
Anexo 6. Manual de instrucciones para el uso del sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	66

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables en el control automático	21
Tabla 2. Operacionalización de las variables en la operación de llenado	22
Tabla 3. Operacionalización de las variables en la operación de vaciado	23
Tabla 4. Parámetros necesarios para determinar los tiempos de llenado y vaciado	44
Tabla 5. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de llenado en relación al volumen inicial y al volumen de llenado	46
Tabla 6. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de llenado	46
Tabla 7. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de vaciado en relación al volumen inicial y al volumen de vaciado	48
Tabla 8. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de vaciado	49
Tabla 9. Estado de Q1, en relación a la condición de los contactos I1, I2, t1 y M1	51
Tabla 10. Estado de Q2, en relación a la condición de los contactos I3, I4, t2 y M2	51

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de un tanque cilíndrico horizontal	7
Figura 2. Relé programable con ocho entradas y cuatro salidas físicas	12
Figura 3. Cable de transmisión de datos entre una PC y el relé programable	12
Figura 4. Simbolización del contacto NA	13
Figura 5. Simbolización del contacto NC	13
Figura 6. Diagrama ladder para prender y temporizar a las salidas Q1 y Q2 de un relé programable	14
Figura 7. Representación del enclavamiento de la bobina M1	18
Figura 8. Representación gráfica del estado de los elementos de un enclavamiento	18
Figura 9. Esquema del diseño de investigación para el control automático	24
Figura 10. Esquema del diseño de investigación para el llenado	25
Figura 11. Esquema del diseño de investigación para el vaciado	26
Figura 12. Tanque cilíndrico horizontal antes de la implementación del sistema automatizado	27
Figura 13. Propuesta para la implementación de un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal	28
Figura 14. Sistema automatizado	31
Figura 15. Diseño y simulación del prendido de la bobina M1, del temporizador TT1 y de la salida física Q1	33
Figura 16. Diseño y simulación del prendido de la bobina M2, del temporizador TT2 y de la salida física Q2	34
Figura 17. Ventana de parámetros del temporizador	35
Figura 18. Equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, después de la implementación del sistema automatizado	38
Figura 19. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado	39
Figura 20. Vistas reales de las líneas de vaciado y llenado	40
Figura 21. Esquema de instalación eléctrica	41

RESUMEN

El objetivo general de la presente tesis fue: implementar un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal; determinándose primeramente la relación entre el volumen con el nivel de líquido, la cual se adecuó y programó en Microsoft Excel 2023 para determinar el volumen inicial y el valor experimental del volumen final de líquido. La implementación del sistema automatizado fue la siguiente: 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). Seguidamente, se elaboró el diagrama ladder para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, lo cual permitió determinar el número de entradas y salidas físicas que se utilizaron del relé programable, las mismas que resultaron: cuatro entradas y dos salidas físicas. Finalmente, se realizaron cinco (5) pruebas para el llenado y cinco (5) para el vaciado. El mínimo (0.205 %) y máximo (1.384 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido, se obtuvo en las pruebas 4 y 5 de la operación de vaciado, respectivamente. De esta manera se ha culminado la presente tesis, cumpliéndose con el objetivo general y la vez probándose la hipótesis general.

Palabras clave: tanque cilíndrico horizontal, sistema automatizado, relé programable, nivel de líquido, volumen de líquido, llenado y vaciado.

ABSTRACT

The general objective of the present thesis was: implementing a system automated for the filling and draining of a liquid in a cylindrical horizontal tank; determining firstly the relation between the volume with the level of liquid, which made suitable itself and programmed in Microsoft Excel 2023 to determine the initial volume and the experimental value of the final volume of liquid. The implementation of the automated system was the following: a programmable relay, two push-buttons NC, two push-buttons NO, two lights led, a thermic key with its bipolar plug, a viewfinder with gauged rule, a line filling (shaped for spans of piping and accessories, the electric pumps filling and a meter of volume) and a line draining (shaped for spans of piping and accessories, the electric pumps draining and a meter of volume). Straightaway, became elaborate the diagram ladder for the automatic control of the filling and draining of a liquid in a cylindrical horizontal tank, which allowed determining the number of inputs and physical outputs that were used of the programmable relay, the same that gave results: four inputs and two physical outputs. At last, five (5) proofs for the filling and five (5) for the draining came true. The minimum (0.205 %) and maximum (1.384 %) percentage error regarding the final volume of liquid, they obtained in the proofs 4 and 5 of the operation of draining, respectively. The present thesis has this way been culminated, coming true with the objective general and the time trying on his general hypothesis.

Keywords: cylindrical horizontal tank, automated system, programmable relay, level of liquid, liquid volume, filling and draining.

INTRODUCCIÓN

Resulta un poco complicado conocer exactamente el volumen que ocupa el líquido cuando un tanque cilíndrico está en posición horizontal, ya que en este caso el volumen que ocupa el líquido es irregular y no se podría calcularlo del mismo modo como si encontraría en un tanque cilíndrico vertical. Sin embargo, se puede aplicar el cálculo integral para encontrar una ecuación que relacione el volumen con el nivel de líquido y las dimensiones del tanque, como son el radio y la longitud. Téngase en cuenta, que el volumen estaría en función del nivel de líquido; es decir, el nivel de líquido representaría a la variable independiente, el volumen a la variable dependiente y el radio con la longitud del tanque serían parámetros. En la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), la automatización de las operaciones de llenado y vaciado de líquidos en tanques cilíndricos, se debe estudiar en los cursos de mecánica de fluidos, laboratorio de ingeniería I y automatización de procesos químicos, los cuales deben generar habilidades y destrezas en los estudiantes de la FIQ-UNAP, ya que en dichas asignaturas se dan a conocer los conocimientos necesarios para optimizar los diferentes procesos industriales.

En el año 2013 en la FIQ-UNAP, realizaron el trabajo de tesis titulado: Diseño, construcción e instalación de un tanque cilíndrico horizontal, para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo (Arce y Arce, 2013, pp. 1-120). Este equipo se encontraba deteriorado e inservible, ya que no contaba con el visor mediante el cual se realizaba la medida del nivel de líquido en el tanque; asimismo, tampoco contaba con las electrobombas para realizar el llenado y vaciado del líquido en forma automática (véase la figura 12). Debido a esta situación, no se podían realizar las prácticas de dichos cursos, específicamente con respecto al control de variables industriales que dependen del tiempo (operaciones en régimen transitorio), generando de esta manera una debilidad en relación a la formación académica del estudiante de la FIQ-UNAP; ya que no estaba adquiriendo todas las habilidades y destrezas que se requería que tenga al haber llevado los mencionados cursos.

Es por esto que, en el presente trabajo de tesis, se plantea la siguiente interrogante general: “¿cuál es el sistema automatizado más adecuado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal?”

Entonces, en relación al problema general, se plantean a continuación los siguientes problemas específicos:

Problemas específicos

- ¿Existirá alguna relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal?
- ¿Existirá alguna relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal?
- ¿Existirá alguna relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal?
- ¿Cuál es el circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal?
- ¿Existirá alguna relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable?

De este modo, correspondientemente al problema general y a los problemas específicos, se formulan el objetivo general y los objetivos específicos.

Objetivo general

Implementar un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

Objetivos específicos

- Determinar la relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal.
- Determinar la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal.

- Determinar la relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal.
- Elaborar el circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.
- Determinar la relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable.

El presente trabajo de tesis es de suma importancia, ya que se está implementando los laboratorios de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos de la FIQ-UNAP, lo cual también se verá reflejado en el mejoramiento de las condiciones de aprendizaje cuando se lleven a cabo las clases teóricas y prácticas de las mencionadas asignaturas; generándose de este modo nuevas habilidades con respecto al diseño, simulación, instrumentación y control de procesos industriales, en los docentes, alumnos y egresados de la mencionada facultad.

La presente tesis, está conformada por los siguientes capítulos que se mencionan a continuación:

- Capítulo I: Marco teórico
- Capítulo II: Hipótesis y variables
- Capítulo III: Metodología
- Capítulo IV: Resultados
- Capítulo V: Discusión
- Capítulo VI: Conclusiones
- Capítulo VII: Recomendaciones
- Capítulo VIII: Fuentes de información

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

- Chong y Ferreyra (2023, pp. xii, 39-73), desarrollaron el trabajo de tesis cuyo título es: “Construcción e instalación de un prototipo para llenado de botellones con agua y su implementación con un controlador lógico programable”. Para esto, diseñaron el circuito lógico que les permitió llevar a cabo la simulación del llenado de botellones con agua; evaluándose de este modo el número de entradas y salidas físicas que se emplearon en el PLC, las cuales resultaron: tres entradas y tres salidas físicas. Seguidamente, evaluaron el caudal producido por la electrobomba de llenado, el cual resultó 28.3 L/min. Finalmente, llevaron a cabo las pruebas de funcionamiento del mencionado prototipo, para lo cual hicieron uso de tres conjuntos de botellones, teniendo los correspondientes volúmenes nominales: cinco (5) de 3.8 L, dos (2) de 4.5 L y tres (3) de 20 L; resultado los respectivos tiempos de llenado: 8.1 s, 9.5 s y 42.4 s. En los diez botellones que utilizaron, determinaron que la menor y mayor diferencia entre el volumen de etiqueta y el volumen experimental fueron: 0.342 % y 2.000 %, respectivamente, el mismo que no excedió del 2 % en relación al volumen de etiqueta, comprobando de este modo que dicho prototipo tiene una eficiencia mayor al 98 %.
- Estrella y Panduro (2023, pp. xi, 1-60), realizaron el trabajo de tesis titulado: “Mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado”. En este trabajo, primeramente, dedujeron un modelo matemático mediante el cual pudieron determinar el tiempo para drenar una cierta cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos, para lo cual aplicaron la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía. Seguidamente, elaboraron el diagrama ladder haciendo uso del software Zelio Soft2 V5.4.2, lo cual también les permitió hacer la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos. Para transferir el diagrama ladder desde una PC al relé programable, utilizaron una interfaz de comunicación, la cual cuenta con dos puertos: COM y USB. A continuación, procedieron a realizar el montaje del sistema automatizado, el mismo que se ensambló con los siguientes componentes: un relé programable, el software de

simulación Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador de paro, un pulsador de inicio, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar. Por último, efectuaron ocho (8) pruebas de funcionamiento, en las cuales se determinaron el tiempo programado en el sistema automatizado, los mismos que resultaron: 58.6 s, 56.2 s, 59.1 s, 50.6 s, 49.0 s, 67.4 s, 59.5 s y 54.5 s, respectivamente. Asimismo, los resultados que obtuvieron en las ocho pruebas de funcionamiento, indican que el máximo porcentaje de error, en relación al nivel final de líquido, al volumen final de líquido y al volumen de drenaje, son: 1.27 %, 3.85 % y 2.02 %, respectivamente; lo cual les permitió verificar que, al hacer uso del mencionado modelo matemático, se logran obtener resultados con una confiabilidad mayor al 95 %.

- [Jara y Ramos \(2018, pp. xi, 99-101\)](#), realizaron el trabajo de tesis titulado: “Diseño y construcción de un prototipo automatizado de un sistema de bombeo de agua para riego pecuario y consumo humano utilizando energía fotovoltaica”. En este trabajo, han tenido en cuenta el problema de la defectuosa aplicación de sistemas fotovoltaicos en sistemas de riego automatizado en las zonas alto andinas, considerando para esto el centro poblado de Ichu, en donde plantearon hacer el prototipo automatizado con paneles fotovoltaicos y realizar el diseño conveniente con la metodología de cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de cebolla de 4.56 mm/día con un área de cultivo de 200 m² y un sistema de riego localizado con eficiencia del 90 % y un caudal de 0.46 L/s, tiempo de riego de 1.14 h/día, con tubería principal de 29.4 mm de diámetro y 12 laterales de 17.4 mm. La evaluación de la cantidad de paneles lo realizaron con datos de heliógrafo mensuales de 5.76 h – pico/día, con un flujo volumétrico de 3.23 L/min y paneles cristalinos Siemens de 12 V y 4.83 A; determinándose de esta forma que la cantidad de paneles requeridos es igual a cuatro (4), con una potencia de 231.84 W cada uno. El sistema automatizado estuvo implementado con el micro controlador Arduino UNO, el cual lo programaron haciendo uso de C/C⁺⁺. Los costos del sistema de riego fotovoltaico y del sistema convencional a electricidad fueron de S/ 5787.7 y S/ 11247.16, respectivamente; concluyendo de esta forma, que el costo del sistema de riego fotovoltaico es mucho menor y que el proyecto es viable a nivel de costos y energía limpia.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos

Felder y Rousseau (2004, p. 546), mencionan que la ecuación general de balance de masa, para procesos no reactivos (sin reacción química), está conformada por tres términos: acumulación, entrada y salida, los cuales se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida.} \quad (1)$$

Sean \hat{m}_E (kg/s) y \hat{m}_S (kg/s) los flujos máxicos a las cuales la sustancia A entra y sale de un proceso, respectivamente. Realizando un balance de masa para la sustancia A, desde un tiempo t , hasta un tiempo posterior $t + \Delta t$, se tiene:

$$\text{Entrada} = \hat{m}_E(\text{kg/s}) \Delta t(\text{s}).$$

$$\text{Salida} = \hat{m}_S(\text{kg/s}) \Delta t(\text{s}).$$

Entonces, la masa acumulada de la sustancia A, dentro del sistema en el intervalo de tiempo Δt , es: Δm (kg). En consecuencia, la ecuación general de balance de masa para la sustancia A, queda:

$$\Delta m = (\hat{m}_E - \hat{m}_S)\Delta t. \quad (2)$$

Dividiendo a todas las cantidades de la ecuación (2) entre Δt y haciendo que Δt se aproxime a cero ($\Delta t \rightarrow 0$), se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dm}{dt} = \hat{m}_E - \hat{m}_S. \quad (3)$$

La ecuación (3), se conoce como la ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos. En el caso que la sustancia A sea un líquido (fluido incompresible), la ecuación (3) queda en términos del volumen (V) y los flujos volumétricos a la entrada Q_E (m³/s) y salida Q_S (m³/s) de un proceso, esto es:

$$\frac{dV}{dt} = Q_E - Q_S. \quad (4)$$

1.2.2. Relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal

A continuación, se puede observar un esquema de un tanque cilíndrico horizontal (figura 1), el cual tiene las áreas laterales planas y circulares, con un radio R_T . La longitud del tanque y el nivel de líquido, se denotan por: L_T y h , respectivamente.

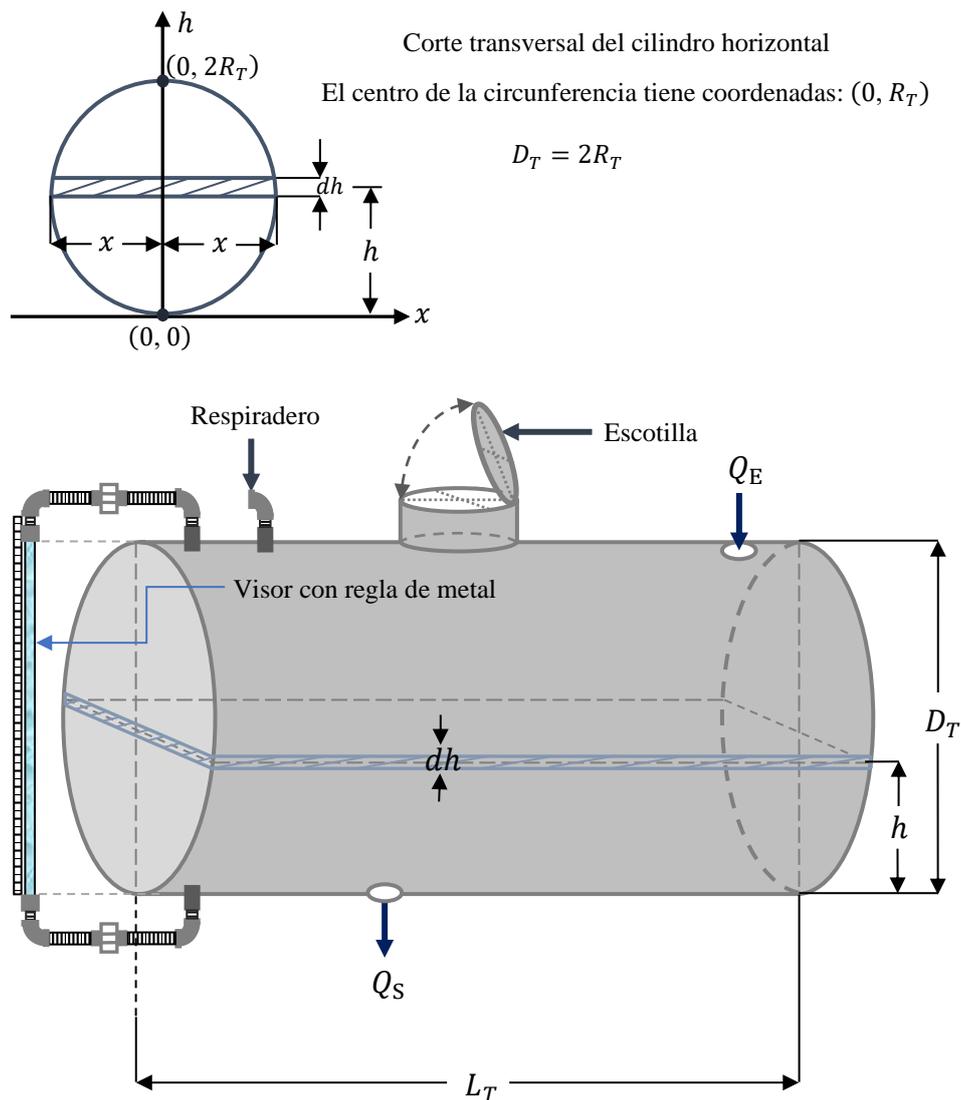


Figura 1. Esquema de un tanque cilíndrico horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el diferencial de volumen (dV), correspondiente al diferencial de nivel de líquido (dh), es:

$$dV = 2L_T x dh. \quad (5)$$

Aplicando la ecuación de la circunferencia para las áreas laterales, se tiene:

$$(x - 0)^2 + (h - R_T)^2 = R_T^2. \quad (6)$$

Despejando x de la ecuación (6), se tiene:

$$x = \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2}. \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación (7) en la ecuación (5), se obtiene:

$$dV = 2L_T \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} dh. \quad (8)$$

Para resolver el término que está al lado derecho de la ecuación (8), se aplica la siguiente fórmula de integración (Venero, 2020, p. 682):

$$\int \sqrt{a^2 - u^2} du = \frac{1}{2} \left[u \sqrt{a^2 - u^2} + a^2 \arcsen \left(\frac{u}{a} \right) \right] + C. \quad (9)$$

Para esto, también es necesario que se realicen los siguientes cambios de variables: $u = h - R_T$ y $a = R_T$. Entonces, la ecuación (8) queda:

$$V = L_T \left[(h - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h - R_T}{R_T} \right) \right] + C. \quad (10)$$

Donde C es la constante de integración, de la cual se obtiene su valor reemplazando las siguientes condiciones: si $h = 0$, entonces $V = 0$.

$$0 = L_T \left[(0 - R_T) \sqrt{R_T^2 - (0 - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{0 - R_T}{R_T} \right) \right] + C$$

$$0 = L_T \left[-R_T \sqrt{R_T^2 - R_T^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{-R_T}{R_T} \right) \right] + C$$

$$L_T[0 + R_T^2 \arcsen(-1)] + C = 0$$

$$C = \frac{\pi}{2} L_T R_T^2. \quad (11)$$

Sustituyendo la igualdad (11) en la igualdad (10), se obtiene la ecuación (12):

$$V = L_T \left[(h - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen\left(\frac{h - R_T}{R_T}\right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (12)$$

La igualdad (12), muestra que el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal, están en relación. Es decir, se puede evaluar el valor del volumen (V), para cualquier valor del nivel de líquido (h). Téngase en cuenta en esta ecuación, que L_T y R_T son parámetros, los cuales sólo cambiarán si se modifican las dimensiones del tanque.

1.2.3. Nivel inicial de líquido

Da a conocer a la altura inicial de líquido en el tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141), se simboliza como h_i y se puede evaluar haciendo una inspección al visor que se encuentra colocado en el tanque cilíndrico horizontal.

1.2.4. Volumen inicial de líquido

Es el volumen correspondiente a h_i (Mott, 2015, p. 141), se denota como V_i y su valor se puede obtener reemplazando el valor de h_i en la ecuación (12), tal como se indica a continuación:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen\left(\frac{h_i - R_T}{R_T}\right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

1.2.5. Tiempo de llenado del tanque cilíndrico horizontal

Es el tiempo requerido para llenar el tanque cilíndrico horizontal con una determinada cantidad de líquido. Su simbolización es t_{LL} , sus unidades de medida están en s y min (Mott, 2015, p. 141) y se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$$

Donde:

V_{LL} = volumen de llenado, m³, L.

Q_E = caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal, m³/s, L/min.

1.2.6. Tiempo de vaciado del tanque cilíndrico horizontal

Es el tiempo requerido para vaciar del tanque cilíndrico horizontal una determinada cantidad de líquido. Su simbolización es t_V , sus unidades de medida están en s y min (Mott, 2015, p. 141) y se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$t_V = \frac{V_V}{Q_S}. \quad (15)$$

Donde:

V_V = volumen de vaciado, m³, L.

Q_S = caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal, m³/s, L/min.

1.2.7. Nivel final de líquido

Se simboliza como $h_{f(Ex)}$ y da a conocer a la altura de líquido en el tanque cilíndrico horizontal al culminar las operaciones de llenado y vaciado. En este caso, sólo se considera el valor experimental, el cual se puede evaluar haciendo una inspección al visor que está situado en el mencionado tanque (Estrella y Panduro, 2023, pp. 21-22).

1.2.8. Volumen final de líquido

Da a conocer a la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico horizontal, al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Mott, 2015, p. 141; Estrella y Panduro, 2023, p. 22). Para este caso, los valores teóricos y experimentales se denotan como $V_{f(T)}$ y $V_{f(Ex)}$, respectivamente, los mismos que se pueden evaluar tal como se indican en las ecuaciones (16), (17) y (18).

Para el llenado:

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$$

Para el vaciado:

$$V_{f(T)} = V_i - V_v. \quad (17)$$

Para el llenado y vaciado:

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1 Sistema de control automático

También se conoce como sistema automatizado, el cual se define como un dispositivo que logra funcionar por sí sólo, el mismo que se encuentra conformado por los siguientes elementos: red eléctrica, controladores lógicos programables o relés, generadores de señal y actuadores (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, pp. 2, 7, 313).

1.3.2. Relé programable

El relé programable es un dispositivo electrónico que representa al cerebro de un sistema de control automático (Estrella y Panduro, 2023, p. 14). Para la programación de dicho relé, se emplea un software de simulación el mismo que trabaja en lenguaje ladder. El relé posee en su estructura básica los siguientes elementos: una entrada de energía, un CPU (Unidad Central de Procesamiento) y una cantidad determinada de entradas y salidas físicas (Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 6; Cucat, 2020, pp. 16-17). En la figura 2, se puede observar un relé programable cuya alimentación trabaja con un voltaje entre 100 – 240 VCA, tiene ocho (8) entradas (I1, I2, ..., I8) y cuatro (4) salidas físicas (Q1, Q2, ..., Q4) (Estrella y Panduro, 2023, p. 14; Gómez y Huayas, 2024, p. 7). Además, el relé posee un display el cual permite visualizar la información transferida desde una PC (computadora personal).

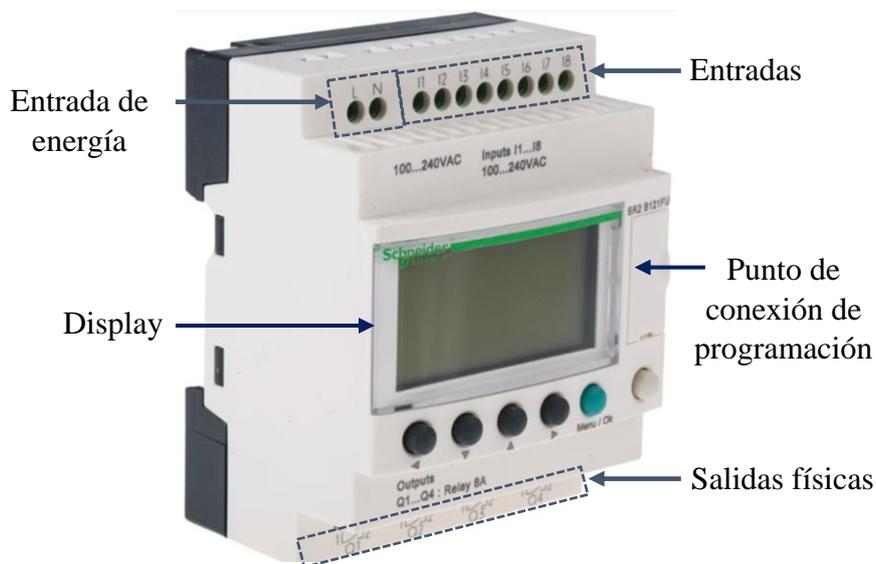


Figura 2. Relé programable con ocho entradas y cuatro salidas físicas.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 14.

El punto de conexión de programación, posee un puerto de comunicación tipo COM, en el cual se conecta el cable de transmisión de datos.

- **Cable de transmisión de datos**

Este dispositivo, sirve para hacer el traspaso de datos desde una PC (computadora personal) al relé programable, el mismo que acopla a dos puertos: COM y USB, los cuales se enlazan al relé programable y a la PC, respectivamente (Estrella y Panduro, 2023, p. 16) (figura 3).



Figura 3. Cable de transmisión de datos entre una PC y el relé programable.

Fuente: Elaboración propia.

- **Entradas y salidas físicas de un relé programable**

Las entradas y salidas físicas de un relé programable, se representan en el software de simulación como contactos (NA o NC) y bobinas, respectivamente; las cuales se pueden conectar correspondientemente a los pulsadores y a los actuadores (electrobombas, luces led, lámparas, electroválvulas, ventiladores, etc.) (Gómez y Huayas, 2024, pp. 9-10).

- **Contacto normalmente abierto (NA)**

El contacto NA es conocido como normalmente abierto, debido a que en su situación normal no permite el paso de energía (Estrella y Panduro, 2023, p. 17). Su simbolización en físico y en el programa de computador del relé, se indican en la figura 4.

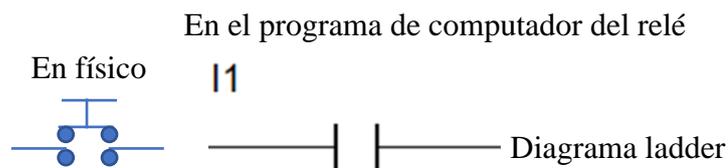


Figura 4. Simbolización del contacto NA.

Fuente: Elaboración propia.

- **Contacto normalmente cerrado (NC)**

Este contacto trabaja de forma inversa al contacto NA; ya que, en su posición normal, si admite el flujo de carga eléctrica (Gómez y Huayas, 2024, p. 9). Su simbolización en físico y en el programa de computador del relé, se indican en la figura 5.

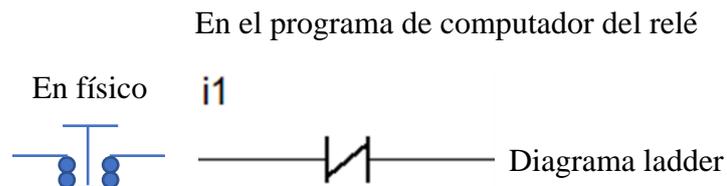


Figura 5. Simbolización del contacto NC.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3. Diagrama ladder o lógica de contactos

En la actualidad, es el lenguaje con el cual trabajan los programas de computadoras para los controladores lógicos y es muy similar a un diagrama eléctrico de lógica cableada. Un diagrama ladder está conformado por un número determinado de contactos, los cuales permiten el encendido o apagado de una salida (Gómez y Huayas, 2024, p. 8). En la figura 6, se puede observar un diagrama ladder para prender y temporizar a las salidas Q1 y Q2 de un relé programable.

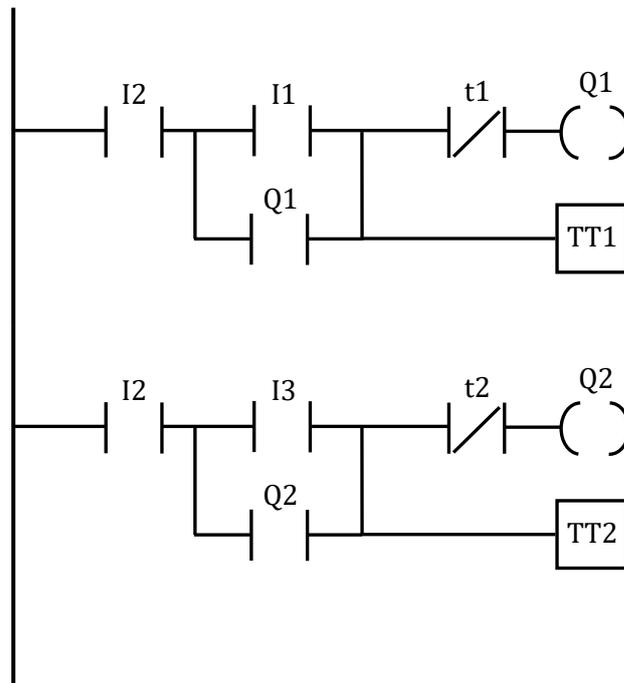


Figura 6. Diagrama ladder para prender y temporizar a las salidas Q1 y Q2 de un relé programable.

Fuente: Elaboración propia.

Al momento que se presiona el pulsador I1, se prende la salida Q1 y se energiza el temporizador TT1, iniciándose de este modo el conteo del tiempo que se encontrará prendida la salida Q1. En el instante que TT1 termina de contabilizar este tiempo, el contacto t1 se abre apagando a Q1. Al instante que se presiona el pulsador I3, se prende la salida Q2 y se energiza el temporizador TT2, iniciándose de esta manera el conteo del tiempo que estará prendida la salida Q2. En el momento que el temporizador TT2 termina de contar este tiempo, el contacto t2 se abre apagando a la salida Q2. Si en caso se presenta

alguna situación imprevista, en ese mismo instante se puede presionar el pulsador I2 apagando a las salidas Q1 y Q2.

1.3.4. Temporizadores

Los temporizadores son componentes internos de un relé programable y cumplen la función de contabilizar el tiempo de funcionamiento de los actuadores (motores eléctricos, electrobombas, compresores, electroválvulas, etc.). Un temporizador se simboliza en el software de programación del relé mediante la letra T con el número respectivo y además posee dos partes: la bobina y los contactos (estos son NA y NC) (Estrella y Panduro, 2023, p. 19).

1.3.5. Caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal

Es el caudal de llenado o flujo volumétrico que produce la electrobomba de llenado (EBL). Se denota como Q_E y se mide en m^3/s o L/min (Mott, 2015, p. 120).

1.3.6. Caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal

Es el caudal de vaciado o flujo volumétrico que produce la electrobomba de vaciado (EBV). Se denota como Q_S y se mide en m^3/s o L/min (Mott, 2015, p. 120). Cabe mencionar que Q_E y Q_S , representan parámetros en las ecuaciones (14) y (15); es decir, estas cantidades se mantendrán constantes cuando se realicen las operaciones de llenado y vaciado.

1.3.7. Variables de control automático

Se refieren específicamente a la condición de las entradas y a la situación de las bobinas internas y las salidas físicas que se usan en el relé programable, las mismas que se describen seguidamente:

- **Condición de las entradas del relé programable donde se enchufan a los pulsadores I1 e I2**

Representan a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran correspondientemente la situación (abierto o cerrado) de las entradas 1 y 2 del relé programable (Chong y

Ferreyra, 2023, pp. 32-33; Estrella y Panduro, 2023, p. 20).

- **Condición de las entradas del relé programable donde se enchufan a los pulsadores I3 e I4**

Representan a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran correspondientemente la situación (abierto o cerrado) de las entradas 3 y 4 del relé programable (Chong y Ferreyra, 2023, pp. 32-33; Estrella y Panduro, 2023, p. 20).

- **Estado de la bobina interna M1**

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (encendido o apagado) de la bobina interior M1 del relé programable, la cual cumple la función de energizar o encender a Q1 y TT1 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Gómez y Huayas, 2024, p. 15).

- **Estado del temporizador TT1**

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (energizado o desenergizado) del temporizador TT1, el mismo que tiene la función de contabilizar el tiempo que se encontrará encendida la salida física Q1 (Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).

- **Estado de la salida física Q1**

Representa a las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran el estado (apagado o encendido) de la salida física del relé programable donde se enchufa a la electrobomba de llenado (EBL) (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

- **Estado de la bobina interna M2**

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (encendido o apagado) de la bobina interna M2 del relé programable, la cual tiene la finalidad de encender a Q2 y TT2 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

- **Estado del temporizador TT2**

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (energizado o desenergizado) del temporizador TT2, el cual tiene la finalidad de contabilizar el tiempo que se encontrará encendida Q2 (Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Chong y Ferreyra, 2023, p. 34; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

- **Estado de la salida física Q2**

Representa a las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran la situación (apagado o encendido) de la salida física del relé programable donde se enchufa a la electrobomba de vaciado (EBV) (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

1.3.8. Enclavamiento o retención

Es una forma de encender o energizar a una bobina interna o salida física de un relé programable, la misma que se mantendrá en esta situación durante todo el tiempo que se requiera (Estrella y Panduro, 2023, p. 18). La bobina se puede prender generándose una señal, para lo cual es necesario presionar un pulsador NA, el mismo que debe conectarse a una entrada del relé.

En las figuras 7 y 8, se puede ver que para prender a la bobina M1, inicialmente, se debe apretar el pulsador de inicio I1(NA), de este modo el contacto de la bobina interna M1 se enclava admitiendo el flujo de carga eléctrica hacia la bobina M1. Para apagar a la bobina M1 en el momento que sea necesario, bastará con presionar el pulsador de paro o stop I2(NC), imposibilitando de este modo el flujo de energía hacia la bobina M1. Cabe mencionar que el pulsador I2, realmente (en físico) es un contacto normalmente cerrado; pero, en el programa de computadora del relé se le representa como un contacto normalmente abierto.

En relación a la figura 7, se obtiene la siguiente equivalencia para el enclavamiento o retención de M1:

$$I1 \times I2 + M1 = M1. \quad (19)$$

Como los contactos I1 e I2 están conectados en serie, sus cantidades binarias se multiplican, es decir: $I1 \times I2$. Ahora, como la serie de los contactos I1 e I2, se encuentra conectada en paralelo al contacto de la bobina M1, entonces se obtiene: $I1 \times I2 + M1$.

En este sentido, $I1 \times I2 + M1$, resulta igual al estado de la bobina M1. De esta forma es que se deduce la ecuación (19).

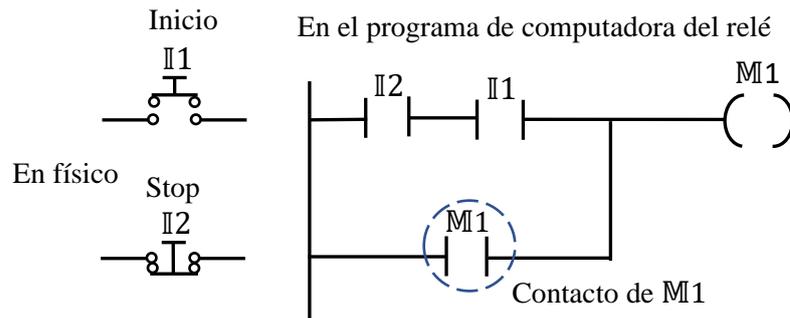


Figura 7. Representación del enclavamiento de la bobina M1.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 19.

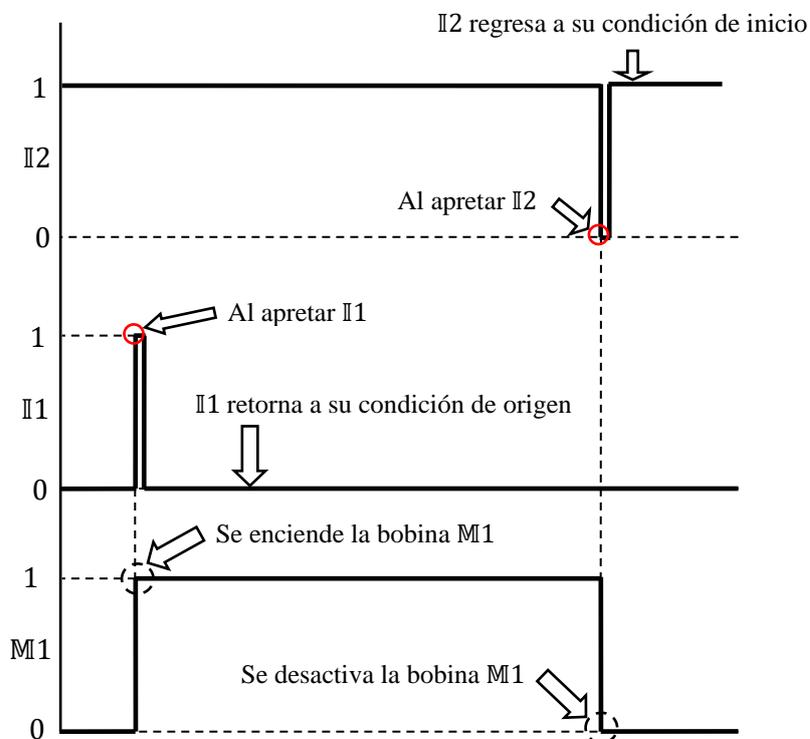


Figura 8. Representación gráfica del estado de los elementos de un enclavamiento.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 19.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

El sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, debe estar implementado con un relé programable el cual debe contar con cuatro entradas y dos salidas físicas.

b. Hipótesis específicas

- Sí, existe relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal.
- Sí, existe relación entre el volumen final de líquido, el nivel inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal.
- Sí, existe relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal.
- El circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, debe ser un diagrama tipo ladder.
- Sí, existe relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable.

2.2. Variables y su operacionalización

- **En el control automático**

Variables independientes: condición de las entradas del relé programable donde se enchufan los pulsadores I1(NA), I2(NC), I3(NA) e I4(NC).

Variables intervinientes: estado de las bobinas de enclavamiento M1 y M2, y estado de los temporizadores TT1 y TT2.

Variables dependientes: estado de las salidas físicas Q1 y Q2 del relé programable, en las cuales se enchufan las electrobombas de llenado y vaciado,

respectivamente.

- **En la operación de llenado**

Variables independientes: nivel inicial de líquido y volumen de llenado.

Variables intervinientes: volumen inicial de líquido y nivel final de líquido.

Variables dependientes: volumen final de líquido y tiempo de llenado.

- **En la operación de vaciado**

Variables independientes: nivel inicial de líquido y volumen de vaciado.

Variables intervinientes: volumen inicial de líquido y nivel final de líquido.

Variables dependientes: volumen final de líquido y tiempo de vaciado.

Tabla 1. Operacionalización de las variables en el control automático.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Condición de las entradas del relé programable donde se enchufan los pulsadores I1(NA), I2 (NC), I3 (NA) e I4 (NC).	I1 I2 I3 I4	Se refieren a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (abierto o cerrado) de las entradas 1, 2, 3 y 4 del relé programable, respectivamente (Chong y Ferreyra, 2023, pp. 32-33; Estrella y Panduro, 2023, p. 20).	Cuantitativa discreta	Abierto: 0 Cerrado: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama ladder • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Intervinientes						
Estado de las bobinas de enclavamiento M1 y M2.	M1 M2	Se refieren a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (prendido o apagado) de las bobinas internas M1 y M2 del relé programable (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Gómez y Huayas, 2024, p. 15).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Encendido: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama ladder • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Estado de los temporizadores TT1 y TT2.	TT1 TT2	Se refieren a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (energizado o desenergizado) de los temporizadores TT1 y TT2 (Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Chong y Ferreyra, 2023, p. 34; Honorio y Molina, 2023, p. 19).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Encendido: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V 5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2023.
Dependientes						
Estado de las salidas físicas Q1 y Q2.	Q1 Q2	Representan a las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran la situación (apagado o prendido) de las salidas físicas del relé programable donde se enchufan la electrobomba de llenado y la electrobomba de vaciado, respectivamente (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33; Honorio y Molina, 2023, p. 19).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Encendido: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Diagrama ladder • Archivo en Microsoft Excel 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Operacionalización de las variables en la operación de llenado.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Nivel inicial de líquido	h_i	Da a conocer a la altura inicial de líquido en el tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m cm	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Volumen de llenado	V_{LL}	Es la cantidad de volumen de líquido que se adiciona al tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Intervinientes						
Volumen inicial de líquido	V_i	Es el volumen correspondiente a h_i (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Nivel final de líquido	$h_{f(Ex)}$	Da a conocer a la altura de líquido en el tanque cilíndrico horizontal al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Estrella y Panduro, 2023, pp.21-22).	Cuantitativa continua	m cm	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Dependientes						
Volumen final de líquido	V_f	Da a conocer a la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico horizontal, al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Mott, 2015, p. 141; Estrella y Panduro, 2023, pp.21-22).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Tiempo de llenado	t_{LL}	Es el tiempo requerido para llenar el tanque cilíndrico horizontal con una determinada cantidad de líquido (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	min s	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Operacionalización de las variables en la operación de vaciado.

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Nivel inicial de líquido	h_i	Da a conocer a la altura inicial de líquido en el tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m cm	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Volumen de vaciado	V_V	Es la cantidad de volumen de líquido que se evacúa del tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Intervinientes						
Volumen inicial de líquido	V_i	Es el volumen correspondiente a h_i (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Nivel final de líquido	$h_{f(Ex)}$	Da a conocer a la altura de líquido en el tanque cilíndrico horizontal al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Estrella y Panduro, 2023, pp.21-22).	Cuantitativa continua	m cm	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Dependientes						
Volumen final de líquido	V_f	Da a conocer a la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico horizontal, al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Mott, 2015, p. 141; Estrella y Panduro, 2023, pp.21-22).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.
Tiempo de vaciado	t_v	Es el tiempo requerido para vaciar del tanque cilíndrico horizontal una determinada cantidad de líquido (Mott, 2015, p. 141).	Cuantitativa continua	min s	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2023.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En el desarrollo de la presente tesis, primeramente, se realizó un estudio de la ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos, del lenguaje ladder y del ambiente del software Zelio Soft2 V5.4.2. A continuación, se programó en Microsoft Excel 2023, la relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Posteriormente, se determinaron los componentes del sistema automatizado y se realizó la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en dicho tanque. Finalmente, se implementó el mencionado sistema y se realizaron las pruebas de funcionamiento. De esta manera, se indica que la presente tesis tiene nivel aplicativo con enfoque cuantitativo y diseño correlacional. Los esquemas del diseño de investigación para el control automático, la operación de llenado y la operación de vaciado, se muestran en las figuras 9, 10 y 11, respectivamente.

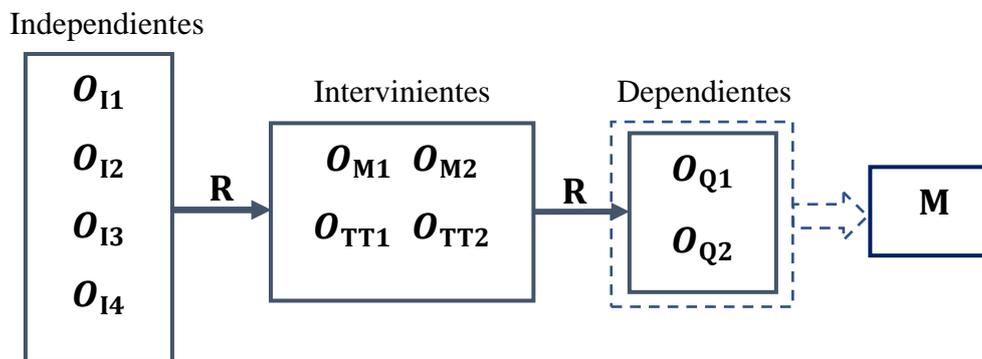


Figura 9. Esquema del diseño de investigación para el control automático.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{I1} , O_{I2} , O_{I3} , O_{I4} , O_{M1} , O_{M2} , O_{TT1} , O_{TT2} , O_{Q1} y O_{Q2} son las observaciones obtenidas en cada una de las diez variables (I1, I2, I3, I4, M1, M2, TT1, TT2, Q1 y Q2), respectivamente.

I1, I2, I3, I4 : condición de las entradas del relé programable que se conectan a los pulsadores I1, I2, I3 e I4 (variables independientes).

- M1, M2 : estado de las bobinas internas M1 y M2 del relé programable (variables intervinientes).
- TT1, TT2 : estado de los temporizadores TT1 y TT2 del relé programable (variables intervinientes).
- Q1 : estado de la salida física del relé programable que se conecta a la electrobomba de llenado (EBL) (variable dependiente).
- Q2 : estado de la salida física del relé programable que se conecta a la electrobomba de vaciado (EBV) (variable dependiente).
- M : muestra.
- R : relación entre las variables.

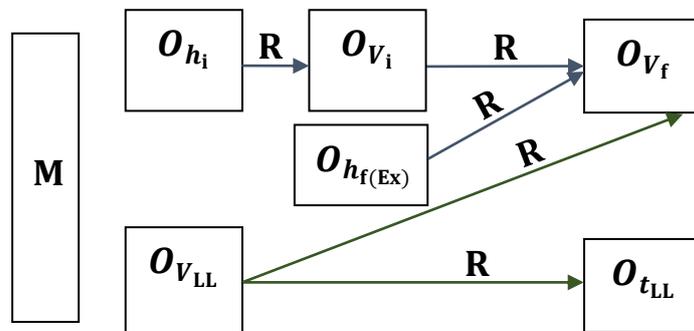


Figura 10. Esquema del diseño de investigación para el llenado.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{h_i} , $O_{V_{LL}}$, O_{V_i} , O_{h_f} , O_{V_f} y $O_{t_{LL}}$, son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (h_i , V_{LL} , V_i , h_f , V_f y t_{LL}), respectivamente.

- h_i : nivel inicial de líquido (variable independiente).
- V_{LL} : volumen de llenado (variable independiente).
- V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).
- $h_{f(EX)}$: nivel final de líquido (variable interviniente).
- V_f : volumen final de líquido (variable dependiente).
- t_{LL} : tiempo de llenado (variable dependiente).
- M : muestra.
- R : relación entre las variables.

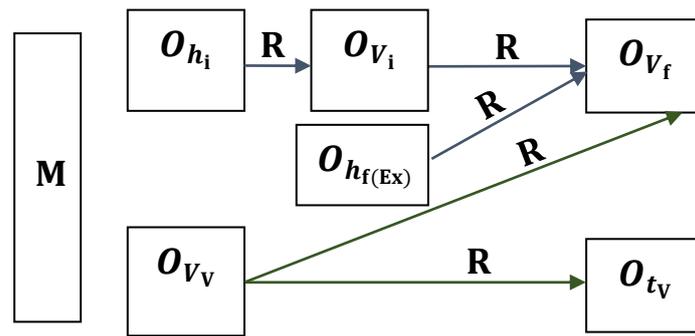


Figura 11. Esquema del diseño de investigación para el vaciado.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{h_i} , O_{V_V} , O_{V_i} , O_{h_f} , O_{V_f} y O_{t_v} , son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (h_i , V_V , V_i , h_f , V_f y t_v), respectivamente.

h_i : nivel inicial de líquido (variable independiente).

V_V : volumen de vaciado (variable independiente).

V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).

$h_{f(EX)}$: nivel final de líquido (variable interviniente).

V_f : volumen final de líquido (variable dependiente).

t_v : tiempo de vaciado (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

3.1.1. Equipo para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo en un tanque cilíndrico horizontal, antes de la implementación del sistema automatizado

Como puede observarse en la figura 12, este equipo se encontraba deteriorado e inservible, debido que no contaba con el visor mediante el cual se realizaba la medida del nivel de líquido en el tanque, ni tampoco con las conexiones eléctricas de las electrobombas; lo cual imposibilitaba conocer el volumen de líquido contenido en el tanque y además de no poder realizar el llenado y vaciado del líquido en forma automática.



Tanque cilíndrico horizontal

Figura 12. Tanque cilíndrico horizontal antes de la implementación del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

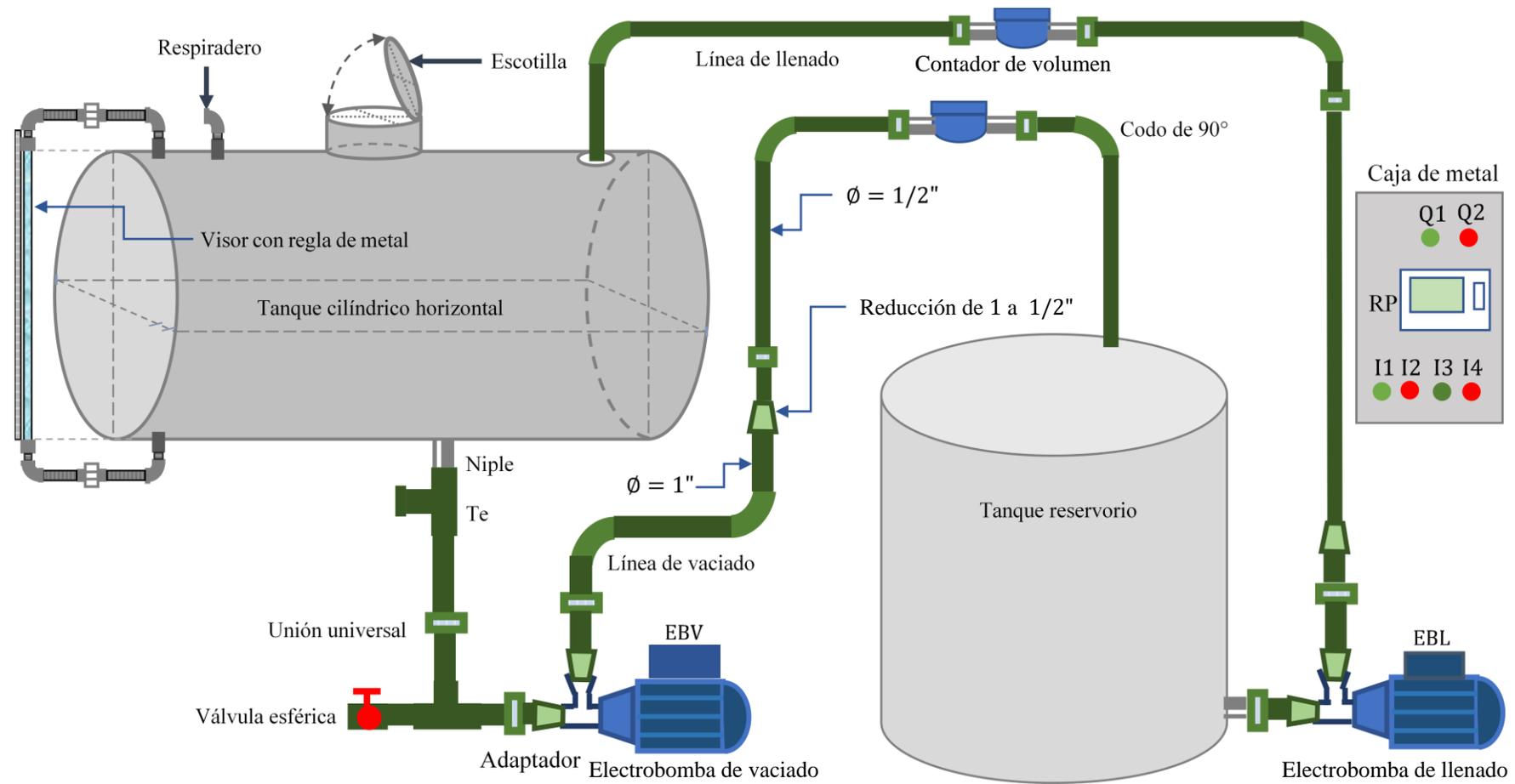


Figura 13. Propuesta para la implementación de un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Propuesta para la implementación de un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal

Comparando las figuras 12 y 13, se puede observar que el sistema automatizado será implementado con los siguientes componentes: un relé programable (RP), una electrobomba de llenado (EBL), una electrobomba de vaciado (EBV), dos pulsadores rojos NC, dos pulsadores verdes NA, dos luces led, una llave térmica con su enchufe bipolar, una caja de metal donde se instalarán el relé programable con las luces led, los pulsadores y la llave térmica, un visor con regla graduada, una línea de llenado (conformada por tramos de tubería recta y accesorios, la electrobomba de llenado y un contador de volumen) y una línea de vaciado (conformada por tramos de tubería recta y accesorios, la electrobomba de vaciado y un contador de volumen).

El llenado del tanque cilíndrico horizontal, se realizará como se indica a continuación:

- Observar el visor con regla graduada, para determinar la altura inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación **(13)** en Microsoft Excel 2023, es posible copiar en una celda el valor de h_i y determinar de forma automática el valor de V_i .
- A continuación, es necesario escribir en otra celda el valor del volumen de líquido que se requiere llenar (V_{LL}). De este modo, aplicando las ecuaciones **(14)** y **(16)**, se determinan el tiempo de llenado (t_{LL}) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente.
- El valor del tiempo de llenado se programa en el relé, el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de llenado presionando el pulsador I1 (NA), lo cual hace que automáticamente el relé programable envíe un pulso eléctrico a la electrobomba de llenado (EBL), haciendo de este modo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led verde que también está enchufada a Q1), admitiendo de esta forma que el líquido que se encuentra dentro del tanque reservorio comience a circular por toda la línea de llenado hasta el tanque cilíndrico horizontal, por todo el tiempo programado. En el momento que el temporizador culmine de contabilizar dicho tiempo, el relé programable enviará otro pulso eléctrico a la electrobomba de llenado (EBL) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led verde). En algún instante que se necesite o

sucediera cualquier inconveniente, es posible presionar el pulsador rojo I2 (NC), desactivando a la electrobomba de llenado.

El vaciado del tanque cilíndrico horizontal, se realizará como se muestra a continuación:

- Se debe inspeccionar dicho visor, para determinar la altura inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación **(13)** en Microsoft Excel 2023, es posible anotar en una celda el valor de h_i y obtener de forma automática el valor de V_i .
- A continuación, se debe copiar en otra celda el valor del volumen de líquido que se requiere vaciar (V_V). De este modo, aplicando las ecuaciones **(15)** y **(17)**, se determinan el tiempo de vaciado (t_V) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente.
- El valor del tiempo de vaciado se programa en el relé, el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de vaciado presionando el pulsador I3 (NA), en ese mismo instante el relé programable enviará un pulso eléctrico a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led roja que también está enchufada a Q2), admitiendo de esta forma que el líquido que se encuentra en el tanque cilíndrico horizontal comience a moverse por toda la línea de vaciado hasta el tanque reservorio, por todo el tiempo programado. Cuando el temporizador culmine de contabilizar dicho tiempo, el relé enviará otro pulso eléctrico a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led roja). En el instante que se requiera o suceda algún imprevisto, será posible presionar el pulsador rojo I4 (NC), desactivando a la electrobomba de vaciado.

Cabe mencionar que los pulsadores I2 e I4, en realidad son contactos normalmente cerrados (NC); pero, en el programa de computadora del relé son representados como contactos normalmente abiertos (NA). También, al finalizar dichas operaciones, se debe realizar nuevamente la inspección al visor para medir el nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$), cuyo valor se debe reemplazar en la ecuación **(18)** para obtener el valor experimental del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$). En la figura 14, se muestra en detalle los componentes que conforman el sistema automatizado.

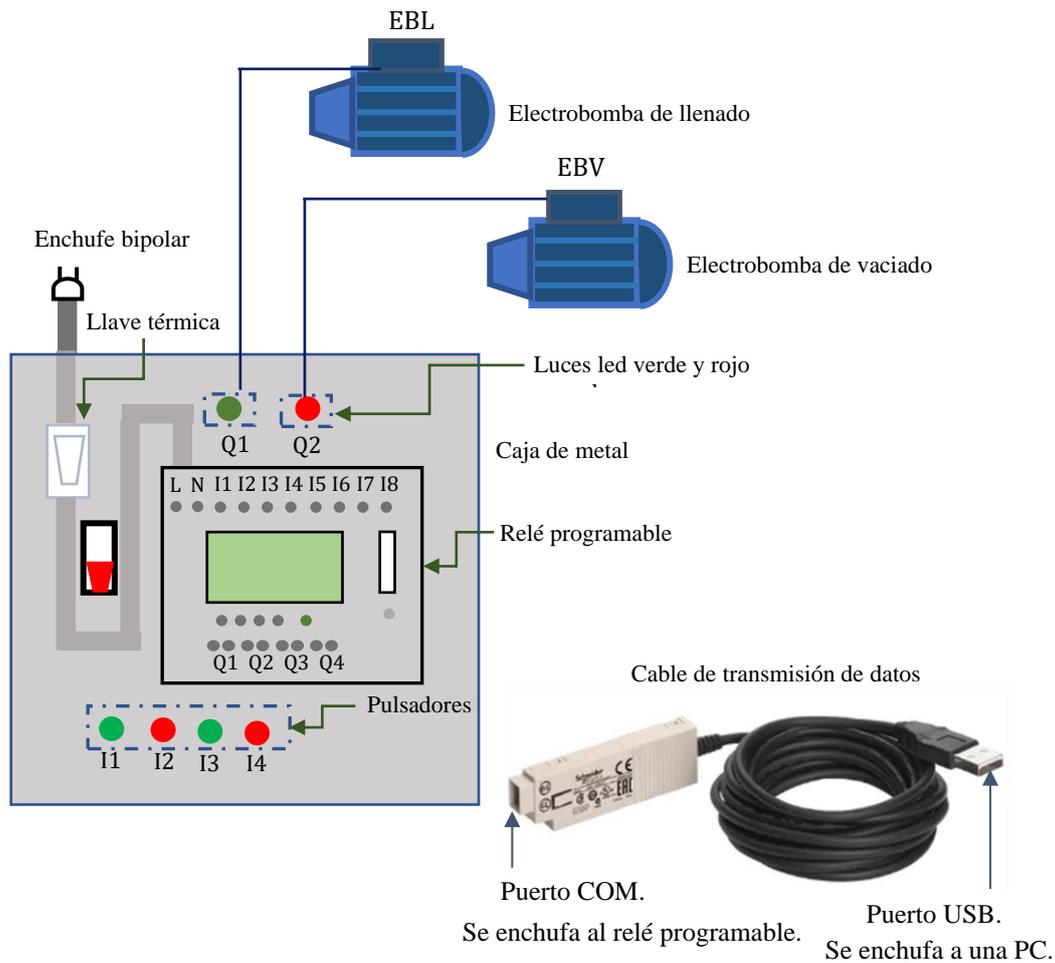


Figura 14. Sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Elaboración del diagrama ladder para la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal

El diagrama ladder para la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, se ha elaborado teniendo en cuenta los siguientes procedimientos:

- **Enclavamiento de la bobina M1.** Consiste en prender a la bobina interna M1, para lo cual necesariamente se tiene que presionar el pulsador verde I1 (NA), de este modo el contacto de M1 se enclavará permitiendo el flujo eléctrico hacia la bobina M1 (figura 15).

- **Prendido del temporizador TT1 y de la salida física Q1.** Al momento que se prende a la bobina M1, su contacto correspondiente se queda enclavado permitiendo el flujo eléctrico hacia TT1 y Q1. Como la electrobomba de llenado se debe enchufar a la salida física Q1; entonces, al prenderse TT1 se inicia la contabilización del tiempo que permanecerá encendida la electrobomba de llenado (figura 15). El valor de dicho tiempo se tiene que escribirlo en la ventana de parámetros del temporizador TT1 (figura 17).

- **Apagado del temporizador TT1 y de la salida física Q1.** En el momento que el TT1 acabe de contabilizar el tiempo de llenado, el contacto t1 se abrirá impidiendo el paso de energía hacia la bobina M1; provocando que automáticamente TT1 y Q1 se apaguen (figura 15).

- **Enclavamiento de la bobina M2.** Consiste en prender a la bobina interna M2, para lo cual necesariamente se debe presionar el pulsador verde I3 (NA), de esta manera el contacto de M2 se enclavará permitiendo el flujo eléctrico hacia la bobina M2 (figura 16).

- **Prendido del temporizador TT2 y de la salida física Q2.** Al momento que se prende a la bobina M2, su contacto correspondiente se queda enclavado haciendo posible el flujo eléctrico hacia TT2 y Q2. Como la electrobomba de vaciado se debe enchufar a Q2; en consecuencia, al prenderse TT2 se da inicio a la contabilización del tiempo que permanecerá encendida la electrobomba de vaciado (figura 16). El valor de dicho tiempo se tiene que anotar en la ventana de parámetros del temporizador TT2 (figura 17).

- **Apagado del temporizador TT2 y de la salida física Q2.** En el momento que el temporizador TT2 culmine de contabilizar el tiempo de vaciado, el contacto t2 se abrirá impidiendo el paso de energía hacia la bobina M2; provocando de esta forma que automáticamente el temporizador TT2 y la salida física Q2 se apaguen (figura 16).

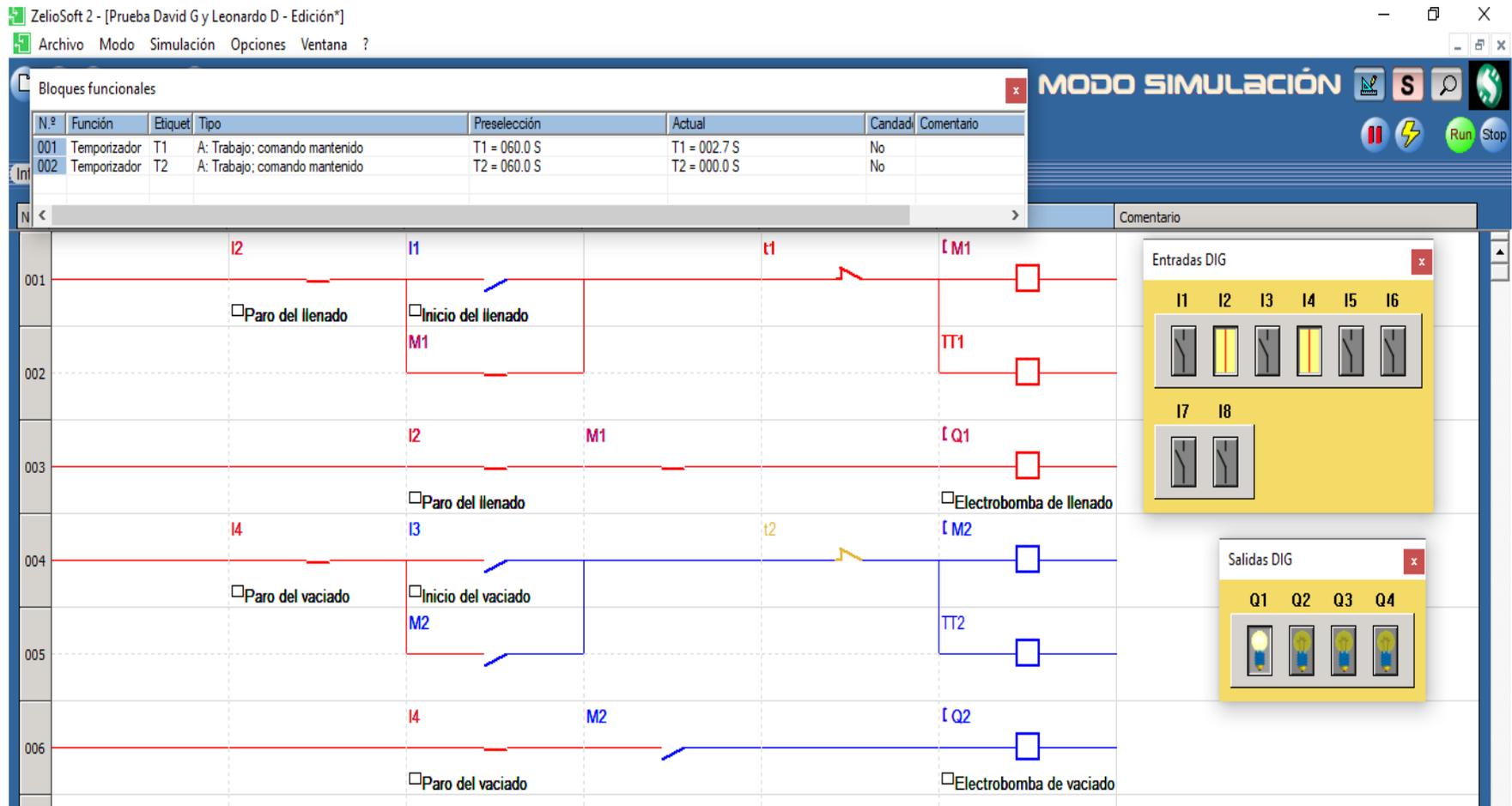


Figura 15. Diseño y simulación del prendido de la bobina M1, del temporizador TT1 y de la salida física Q1.

Fuente: Elaboración propia.

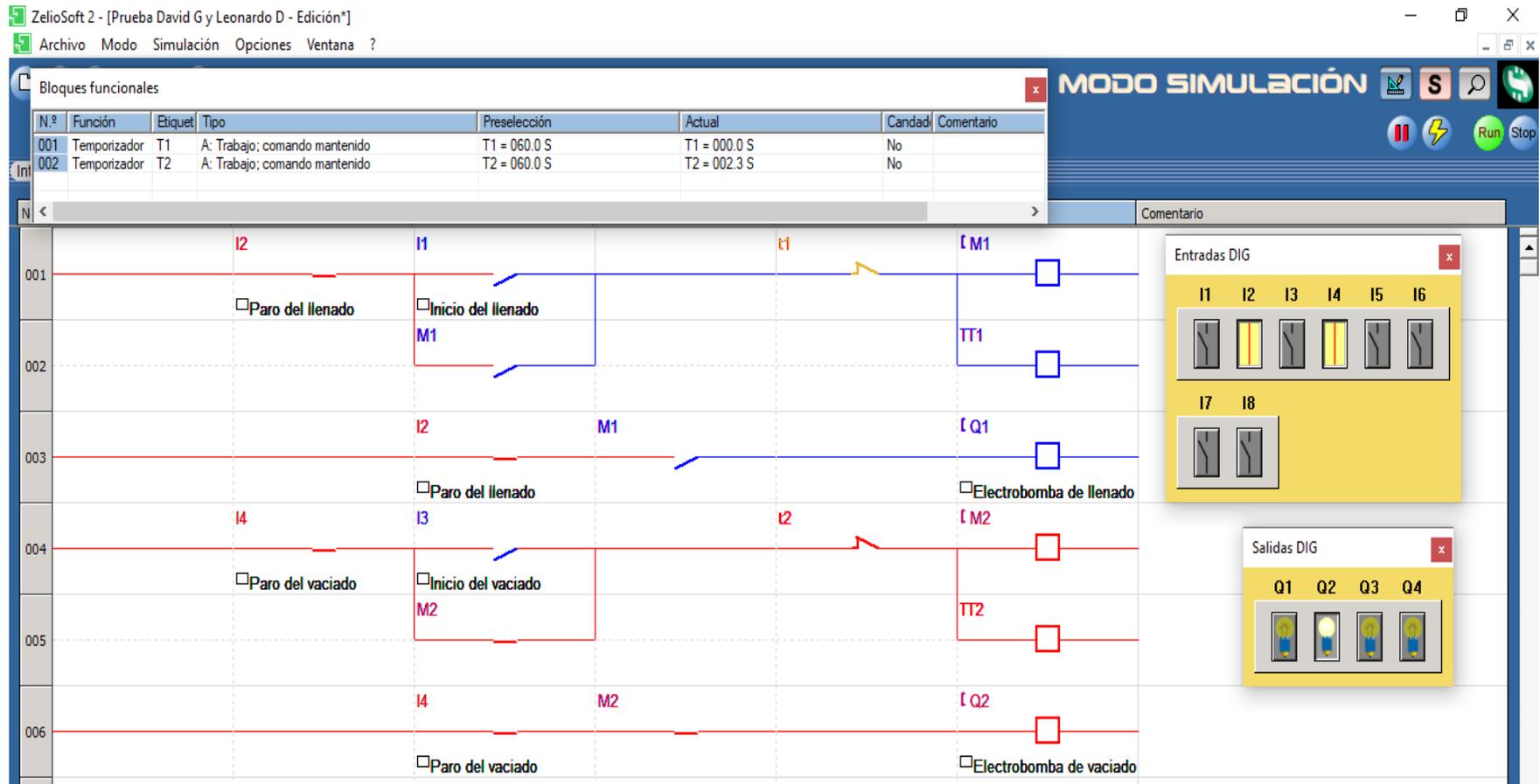


Figura 16. Diseño y simulación del prendido de la bobina M2, del temporizador TT2 y de la salida física Q2.

Fuente: Elaboración propia.

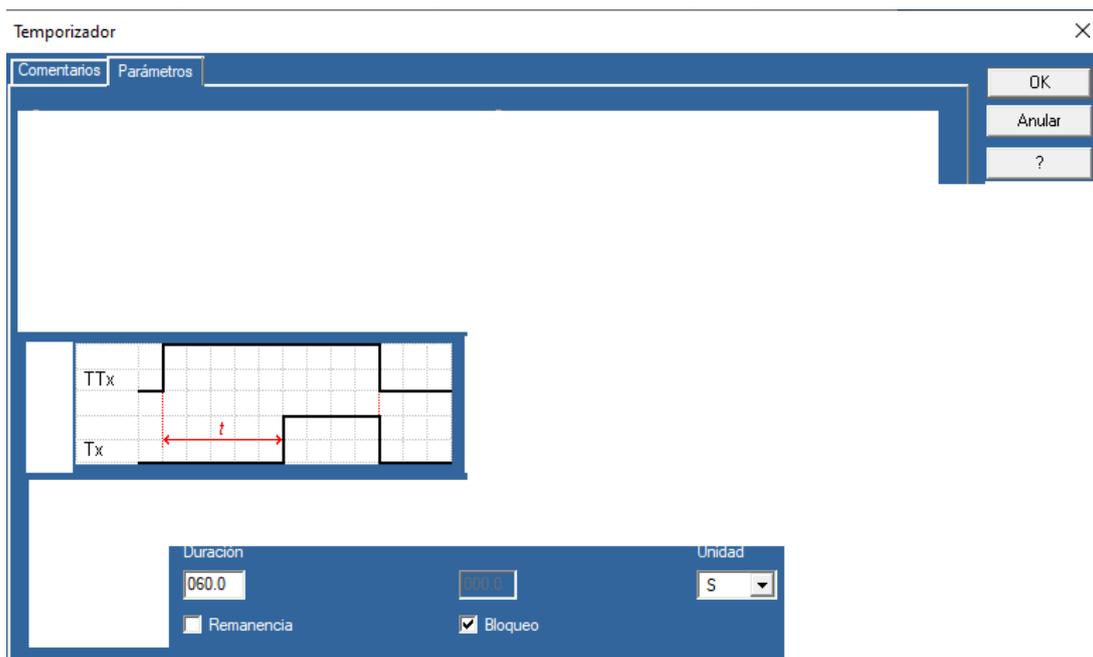


Figura 17. Ventana de parámetros del temporizador.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable

En concordancia a lo descrito en los ítems 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3, se estableció el siguiente orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable:

- Los pulsadores I1 (NA) e I2 (NC), se enchufan a las entradas 1 y 2 del relé programable, respectivamente.
- Los pulsadores I3 (NA) e I4 (NC), se enchufan a las entradas 3 y 4 del relé programable, respectivamente.
- A la salida física Q1 del relé programable, se enchufan la electrobomba de llenado (EBL) y la luz led verde.
- A la salida física Q2 del relé programable, se enchufan la electrobomba de vaciado (EBV) y la luz led roja.

También, es preciso indicar que los puertos COM y USB del cable de transmisión de datos, se tienen que enchufar al relé programable y a una PC (computadora personal), respectivamente.

3.1.5. Relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de las salidas físicas del relé programable

El diagrama ladder elaborado en la sección 3.1.3, también se puede representar por medio de un sistema de ecuaciones, las cuales relacionan a la condición de las entradas (I1, I2, I3, e I4), el estado de las bobinas internas (M1 y M2) y el estado de las salidas físicas (Q1 y Q2) del relé programable.

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = M1. \quad (20)$$

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = TT1. \quad (21)$$

$$I2 * M1 = Q1. \quad (22)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = M2. \quad (23)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = TT2. \quad (24)$$

$$I4 * M2 = Q2. \quad (25)$$

La ecuación (20), indica la relación entre la condición de las entradas I1(NA) e I2 (NC), el estado del contacto t1 (NC) y el estado de la bobina M1. En este sentido, para que M1 sea encendida y su contacto correspondiente permanezca enclavado, obligatoriamente los contactos I2 y t1 deben estar cerrados y previamente se tiene que haber presionado el pulsador I1.

La ecuación (21), indica la relación entre la condición de las entradas I1(NA) e I2 (NC), el estado del contacto t1 (NC), el estado de la bobina M1 y el estado de la bobina del temporizador TT1. En consecuencia, para que la bobina del temporizador TT1 permanezca prendida, obligatoriamente los contactos I2 y t1 tienen que encontrarse cerrados y previamente se debe hacer el prendido de la bobina M1 para que su contacto respectivo permita el flujo eléctrico hacia la bobina del temporizador TT1.

La ecuación (22), da a conocer la relación entre la condición de la entrada I2, el estado de la marca M1 y el estado de la salida física Q1. En consecuencia, para que la salida física Q1 esté encendida, obligatoriamente los contactos I2 y M1 tienen que encontrarse cerrados.

La ecuación (23), indica la relación entre la condición de las entradas I3(NA) e I4 (NC), el estado del contacto t2 (NC) y el estado de la bobina M2. En consecuencia, para que M2 sea encendida y su contacto correspondiente permanezca enclavado, obligatoriamente los contactos I4 y t2 deben estar cerrados y previamente se tiene que presionarse el pulsador I3.

La ecuación (24), indica la relación entre la condición de las entradas I3(NA) e I4 (NC), el estado del contacto t2 (NC), el estado de la bobina M2 y el estado de la bobina del temporizador TT2. En consecuencia, para que la bobina del temporizador TT2 se encuentre prendida, obligatoriamente los contactos I4 y t2 se tienen que encontrarse cerrados y previamente se debe haberse prendido a la bobina M2 para que su contacto respectivo permita el flujo eléctrico hacia la bobina del temporizador TT2.

Como el estado de las bobinas M1 y M2, serán los mismos que el de sus contactos respectivos; entonces, al relacionar las ecuaciones (20) con (22) y (23) con (25), se deducen las ecuaciones que relacionan a la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas y el estado de las salidas físicas del relé programable, es decir:

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = Q1. \quad (26)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = Q2. \quad (27)$$

3.1.6. Implementación del sistema automatizado en el equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal

En relación a las figuras 13 y 14, se ha realizado la implementación del sistema automatizado en el equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.



Figura 18. Equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, después de la implementación del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 19 y 20, se muestra en mayor detalle las vistas reales de los componentes del sistema automatizado y de las líneas de vaciado y llenado, respectivamente.

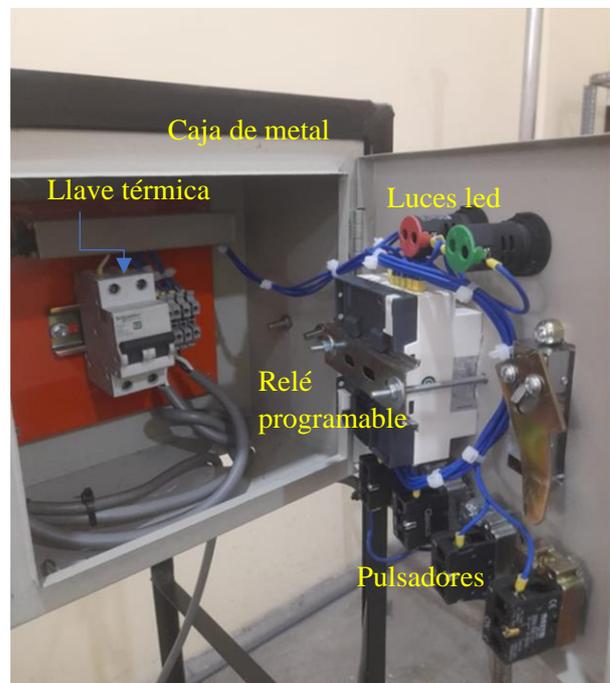
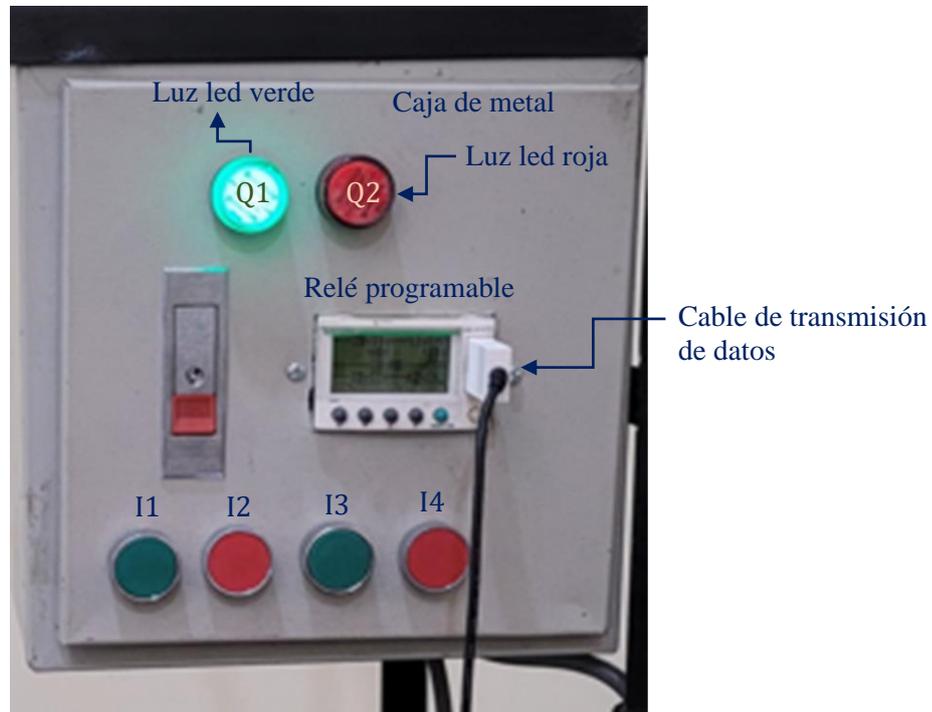


Figura 19. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

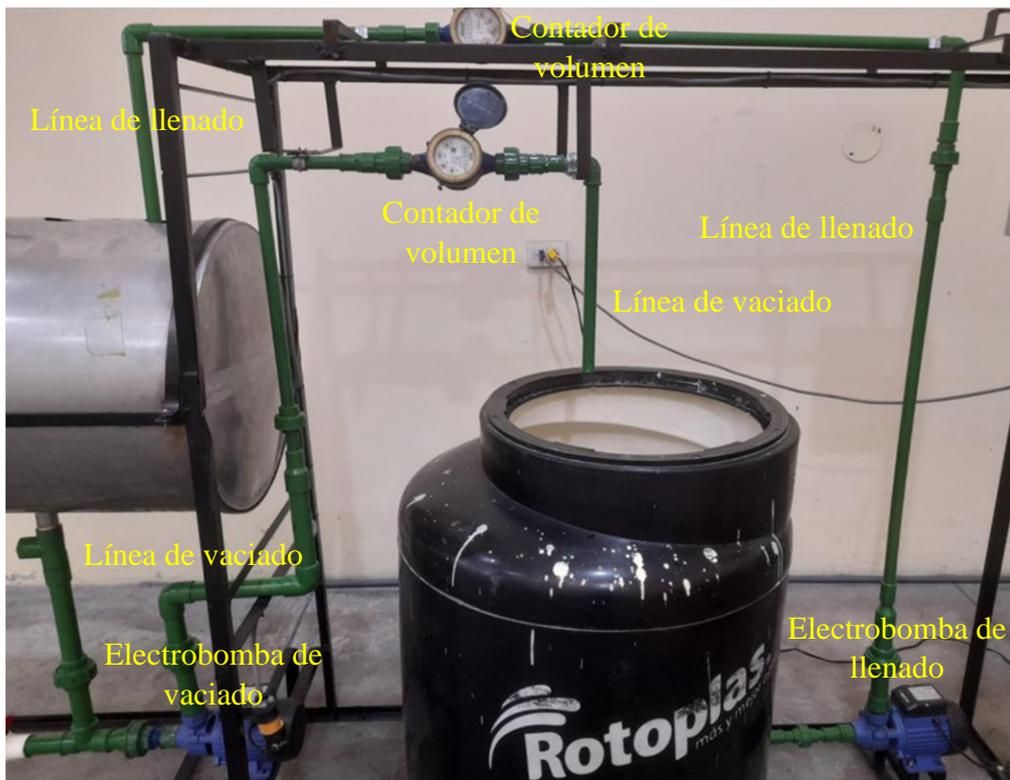


Figura 20. Vistas reales de las líneas de vaciado y llenado.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, en la figura 21 se da a conocer el esquema de instalación eléctrica, para lo cual se ha tenido en cuenta el orden de conexiones entre las entradas y salidas físicas del relé programable.

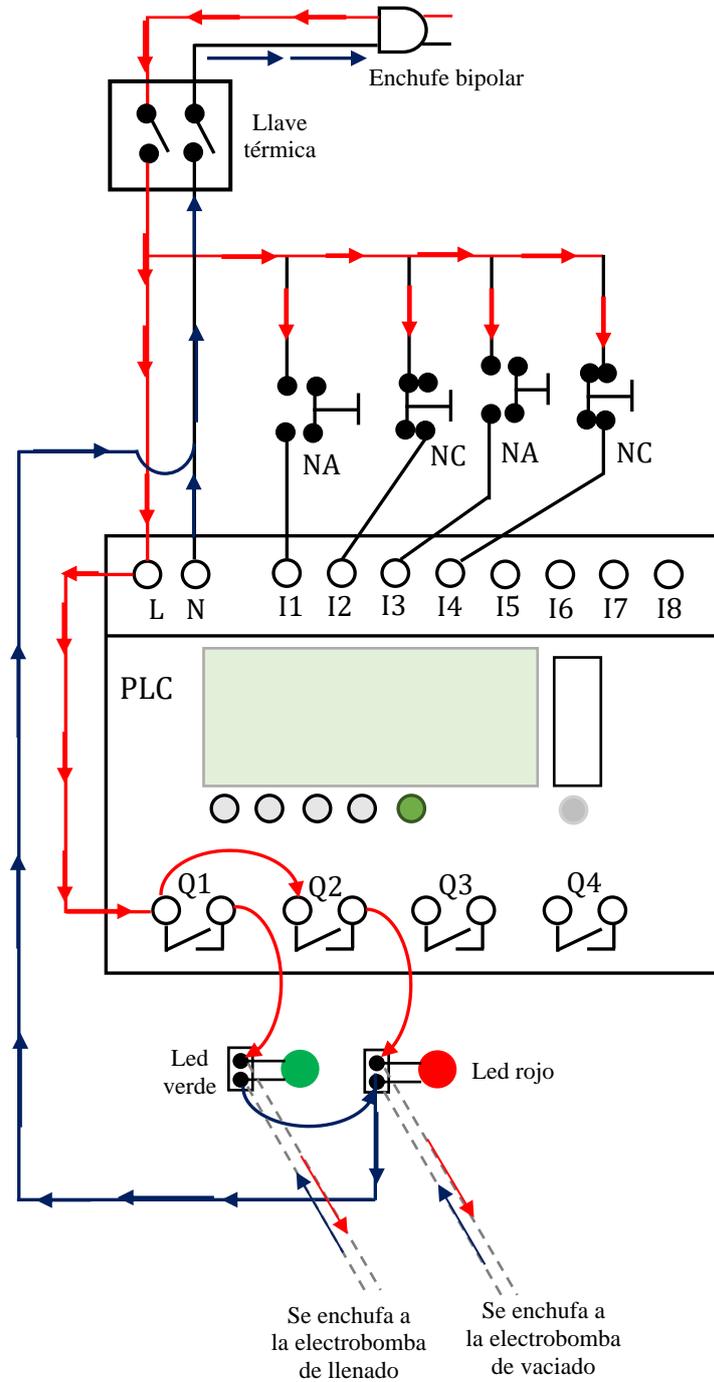


Figura 21. Esquema de instalación eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño muestral

Para el control automático, se consideró como población al número total de elementos que conformaron el diagrama ladder, el mismo que se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Población} = N_{BI} + N_{SF} + N_{Cts} + N_T. \quad (28)$$

Donde:

N_{BI} : número de bobinas internas.

N_{SF} : número de salidas físicas.

N_{Cts} : número de contactos.

N_T : número de temporizadores.

En este sentido y en concordancia a lo descrito en la sección 3.1.3, se tiene que:

$$N_{BI} = 2 \text{ (M1 y M2)}, N_{SF} = 2 \text{ (Q1 y Q2)}, N_{Cts} = 8, N_T = 2 \text{ (TT1 y TT2)}.$$

$$\text{Población} = 2 + 2 + 8 + 2 = 14.$$

Es preciso indicar que el número de contactos se determinó de la siguiente manera: 4 contactos de entradas (I1, I2, I3 e I4), dos contactos de bobinas internas (M1 y M2) y dos contactos de temporizadores (TT1 y TT2). Así, el número de contactos (N_{Cts}) resultó igual a 8.

En consecuencia, el tamaño de la población en el control automático es igual a catorce (14). En la presente tesis, se ha utilizado el tipo de muestreo no probabilístico, teniéndose en cuenta los siguientes criterios:

Criterio de inclusión: se ha considerado exclusivamente como muestra, a las salidas físicas Q1 y Q2 del relé programable, ya que en estas salidas se deben enchufar a la electrobomba de llenado y a la electrobomba de vaciado, las mismas que deben prenderse de acuerdo al tiempo programado en los temporizadores TT1 y TT2, respectivamente.

Criterio de exclusión: no se han tenido en cuenta como muestra a los siguientes elementos del diagrama ladder: las dos bobinas internas (M1 y M2), los ocho contactos y los dos temporizadores (TT1 y TT2); ya que se busca específicamente visualizar el estado de las salidas físicas del relé programable, en las cuales se deben conectar las electrobombas de llenado y vaciado.

Entonces, en relación a esto, el tamaño de la muestra en el control automático resultó igual a dos (2).

Para el caso de las operaciones de llenado y vaciado, la población se considera a la cantidad de pruebas de funcionamiento, lo cual muestra que el tamaño de población podría ser una cantidad muy grande. Entonces, de este modo a criterio de los investigadores, se determinó que el tamaño de muestra es igual a las diez (10) pruebas de funcionamiento que se han llevado a cabo en el mencionado equipo; es decir, se realizaron cinco (5) pruebas para el llenado y cinco (5) pruebas para el vaciado.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

La recolección de datos, estuvo fundamentado en las siguientes instrucciones que se señalan a continuación:

- Elaboración del esquema del sistema automatizado para el control de llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal. El desarrollo de este procedimiento, se muestra en detalle en la sección 3.1.2, lo cual sirvió para determinar los componentes principales del sistema automatizado y la cantidad de entradas y salidas físicas que se emplearon en el relé programable.
- Elaboración del circuito lógico (diagrama ladder) más apropiado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, utilizándose como instrumento el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2. Este procedimiento hizo posible fijar el orden de conexiones para las entradas y salidas físicas que se utilizaron en el relé programable.
- Determinación de las dimensiones del tanque cilíndrico horizontal (radio: R_T y longitud L_T). Para este procedimiento, se utilizó como instrumento una wincha flexómetro (véase la tabla 4).

- Determinación de los niveles de líquido inicial (h_i) y final ($h_{f(Ex)}$), para lo cual se realizó una inspección al visor del tanque cilíndrico horizontal, al inicio y al final de cada prueba.
- Determinación del valor del volumen inicial de líquido (V_i), mediante la aplicación de la ecuación (13). En este caso, se reemplazó en la ecuación (13) el valor del nivel inicial de líquido (h_i) junto con los valores de las dimensiones del tanque cilíndrico horizontal (radio: R_T y longitud L_T).
- Determinación de los caudales que producen las electrobombas de llenado (Q_E) y vaciado (Q_S). Para este procedimiento se hizo fluir el líquido, 5 min por la línea de llenado y 5 min por la línea de vaciado y se verificó el volumen registrado en los medidores que se encuentran instalados en dichas líneas, los cuales resultaron: 148 L y 153 L, respectivamente (véase la tabla 4). De esta manera los caudales de llenado y vaciado, se determinaron como se indica a continuación:

$$Q_E = \frac{148 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 29.6 \text{ L/min.}$$

$$Q_S = \frac{153 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 30.6 \text{ L/min.}$$

Tabla 4. Parámetros necesarios para determinar los tiempos de llenado y vaciado.

Q_E		Q_S		R_T	L_T
L/min	m ³ /s	L/min	m ³ /s	m	m
29.6	0.000493	0.000510	30.6	0.25	1

Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del tiempo correspondiente al llenado (t_{LL}) y vaciado (t_V) en el tanque cilíndrico horizontal, para lo cual se aplicó las ecuaciones (14) y (15), respectivamente.
- Determinación del valor teórico del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$), en las operaciones de llenado y vaciado, para lo cual se aplicó las ecuaciones (16) y (17), respectivamente.

- Determinación del valor experimental del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), en las operaciones de llenado y vaciado, para lo cual se aplicó la ecuación (18).

3.4. Procesamiento y análisis de datos

En la presente tesis, el procesamiento y análisis de datos se realizó mediante los siguientes procedimientos que se indican a continuación:

- Programación de las ecuaciones (13) y (18), las cuales relacionan el volumen y el nivel de líquido en el tanque cilíndrico horizontal, utilizándose para esto las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2023.
- Programación de las ecuaciones (14) y (15), las cuales relacionan los tiempos de llenado y vaciado con los volúmenes respectivos, a tal efecto se utilizó como instrumento las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2023.
- Simulación del diagrama ladder, mediante el uso del software Zelio Soft2 V5.4.2.
- Transferencia de datos desde una PC (laptop) al relé programable, mediante el cable de transmisión de datos.
- Determinación del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido. En este caso se programó en las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2023, las ecuaciones (16) y (17), para determinar el valor teórico del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$) en las operaciones de llenado y vaciado. Para determinar el valor experimental del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), se aplicó la ecuación (18). Entonces, el error porcentual con respecto al volumen final teórico, se determinó con la siguiente ecuación:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}| \times 100}{V_{f(T)}}. \quad (29)$$

3.5. Aspectos éticos

Como tesis y egresados de la FIQ-UNAP, indicamos que la presente investigación es legítima y no existe plagio alguno con respecto a otra investigación o artículo científico, dando a conocer en forma precisa a todas las citas bibliográficas empleadas. Además, acordamos en aceptar la autenticidad de los resultados que se han obtenido en las diez (10) pruebas de funcionamiento realizadas en dicho equipo.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 5. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de llenado en relación al volumen inicial y al volumen de llenado.

Prueba N°	h_i		V_i		V_{LL}	$V_{f(T)}$	t_{LL}	
	cm	m	m ³	L	L	L	min	s
1	9.8	0.098	0.02716	27.16	40	67.16	1.351	81.1
2	18.5	0.185	0.06604	66.04	45	111.04	1.520	91.2
3	26.6	0.266	0.10617	106.17	30	136.17	1.014	60.8
4	22.4	0.224	0.08520	85.20	38	123.20	1.284	77.0
5	17.1	0.171	0.05934	59.34	45	104.34	1.520	91.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de llenado.

Prueba N°	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$		$V_{f(T)}$	Error
	cm	m	m ³	L	L	%
1	18.8	0.188	0.06750	67.50	67.16	0.501
2	27.5	0.275	0.11065	110.65	111.04	0.352
3	32.5	0.325	0.13510	135.10	136.17	0.782
4	29.9	0.299	0.12252	122.52	123.20	0.553
5	26.3	0.263	0.10467	104.67	104.34	0.316

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del volumen inicial de líquido, que se indican en la tabla 5, se han determinado aplicando la ecuación (13), en donde se reemplazaron los valores del nivel inicial de líquido (h_i) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 4). De esta forma, para obtener la

cantidad correspondiente a la segunda prueba ($V_i = 0.06604 \text{ m}^3 = 66.04 \text{ L}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]$$

$$V_i = (1) \left[(0.185 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.185 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.185 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_i = 0.06604 \text{ m}^3 = 66.04 \text{ L.}$$

Los valores teóricos del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$), que se muestran en la tabla 5, se han determinado aplicando la ecuación **(16)**, en donde se reemplazaron los valores del volumen inicial de líquido (V_i) y del volumen de llenado (V_{LL}). De esta manera, para obtener el valor que corresponde a la segunda prueba ($V_{f(T)} = 111.04 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL} = 66.04 + 45 = 111.04 \text{ L.}$$

Los valores del tiempo de llenado (t_{LL}), que se dan a conocer en la tabla 5, se han obtenido aplicándose la ecuación **(14)**, en donde se reemplazaron los valores del volumen de llenado (V_{LL}) y el caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal ($Q_E = 29.6 \text{ L/min}$) (véase también la tabla 4). Por ejemplo, para obtener la cantidad que corresponde a la segunda prueba ($t_{LL} = 1.520 \text{ min} = 91.2 \text{ s}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E} = \frac{45 \text{ L}}{29.6 \text{ L/min}} = 1.520 \text{ min} = 91.2 \text{ s.}$$

Los resultados experimentales del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), que se indican en la tabla 6, se han obtenido aplicándose la ecuación **(18)**, en donde se reemplazaron los valores del nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$) con los valores del radio ($R_T = 0.25 \text{ m}$) y la longitud ($L_T = 1 \text{ m}$) del tanque cilíndrico horizontal (véase también

la tabla 4). De esta forma, para obtener el valor que corresponde a la segunda prueba ($V_{f(Ex)} = 0.11065 \text{ m}^3 = 110.65 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(Ex)} = (1) \left[(0.275 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.275 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen\left(\frac{0.275 - 0.25}{0.25}\right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_{f(Ex)} = 0.11065 \text{ m}^3 = 110.65 \text{ L.}$$

Los resultados del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido, que se indican en la tabla 6, se han obtenido haciendo uso de la ecuación (29). De este modo, para obtener el valor correspondiente a la segunda prueba (Error = 0.352 %), se calculó como se indica a continuación:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}| \times 100}{V_{f(T)}} = \frac{|111.04 - 110.65| \times 100}{111.04} = 0.352 \%$$

Entonces, de esta forma es que sean obtenido todos los demás valores del volumen inicial de líquido, del tiempo de llenado, del volumen final de líquido y del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido.

Tabla 7. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de vaciado en relación al volumen inicial y al volumen de vaciado.

Prueba N°	h_i		V_i		V_V L	$V_{f(T)}$ L	t_V	
	cm	m	m^3	L			min	s
1	25.7	0.257	0.10167	101.67	30	71.67	0.980	58.8
2	38.5	0.385	0.16223	162.23	40	122.23	1.307	78.4
3	29.7	0.297	0.12154	121.54	45	76.54	1.471	88.2
4	33.4	0.334	0.13937	139.37	44	95.37	1.438	86.3
5	24.4	0.244	0.09518	95.18	35	60.18	1.144	68.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de vaciado.

Prueba N°	$h_{f(\text{Ex})}$		$V_{f(\text{Ex})}$		$V_{f(\text{T})}$	Error %
	cm	m	m^3	L	L	
1	19.5	0.195	0.07090	70.90	71.67	1.083
2	29.7	0.297	0.12154	121.54	122.23	0.571
3	20.5	0.205	0.07580	75.80	76.54	0.965
4	24.4	0.244	0.09518	95.18	95.37	0.205
5	17.1	0.171	0.05934	59.34	60.18	1.384

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del volumen inicial de líquido, que se muestran en la tabla 7, se han determinado haciendo uso de la ecuación (13), en donde se reemplazaron los valores del nivel inicial de líquido (h_i) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 4). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_i = 0.12154 \text{ m}^3 = 121.54$ L), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]$$

$$V_i = (1) \left[(0.297 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.297 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.297 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_i = 0.12154 \text{ m}^3 = 121.54 \text{ L.}$$

Los valores teóricos del volumen final de líquido ($V_{f(\text{T})}$), que se dan a conocer en la tabla 7, se han determinado aplicándose la ecuación (17), en donde se reemplazaron los valores del volumen inicial de líquido (V_i) y del volumen de vaciado (V_V). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_{f(\text{T})} = 76.54$ L), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(T)} = V_i - V_V = 121.54 - 45 = 76.54 \text{ L.}$$

Los valores del tiempo de vaciado (t_V), que se muestran en la tabla 7, se han determinado aplicando la ecuación **(15)**, en donde se reemplazaron los valores del volumen de vaciado (V_V) y el caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal ($Q_S = 30.6 \text{ L/min}$) (véase también la tabla 4). De este modo, para obtener la cantidad correspondiente a la tercera prueba ($t_V = 1.471 \text{ min} = 88.2 \text{ s}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$t_V = \frac{V_V}{Q_S} = \frac{45 \text{ L}}{30.6 \text{ L/min}} = 1.471 \text{ min} = 88.2 \text{ s.}$$

Los resultados experimentales del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), que se indican en la tabla 8, se han determinado aplicando la ecuación **(18)**, en donde se reemplazaron los valores del nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$) con los valores del radio ($R_T = 0.25 \text{ m}$) y la longitud ($L_T = 1 \text{ m}$) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 4). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_{f(Ex)} = 0.07580 \text{ m}^3 = 75.80 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(Ex)} = (1) \left[(0.205 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.205 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.205 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_{f(Ex)} = 0.07580 \text{ m}^3 = 75.80 \text{ L.}$$

Los resultados del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido, que se muestran en la tabla 8, se han obtenido haciendo uso de la ecuación **(29)**. Por ejemplo, para obtener la cantidad que corresponde a la tercera prueba (Error = 0.965 %), se realizó el cálculo siguiente:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}| \times 100}{V_{f(T)}} = \frac{|76.54 - 75.80| \times 100}{76.54} = 0.965 \text{ \%}.$$

Entonces, de esta forma es que sean obtenido todos los demás valores del tiempo de llenado, del volumen final de líquido y del error porcentual correspondiente.

Tabla 9. Estado de Q1, en relación a la condición de los contactos I1, I2, t1 y M1.

		I1	I2	t1	M1	Q1	Electrobomba de llenado
Cantidad binaria	1	1	1	1	1	1	Prendido
	0	1	1	1	1	1	Prendido
	0	0	0	0	0	0	Apagado
	0	1	1	0	0	0	Apagado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Estado de Q2, en relación a la condición de los contactos I3, I4, t2 y M2.

		I3	I4	t2	M2	Q2	Electrobomba de vaciado
Cantidad binaria	1	1	1	1	1	1	Prendido
	0	1	1	1	1	1	Prendido
	0	0	0	0	0	0	Apagado
	0	1	1	0	0	0	Apagado

Fuente: Elaboración propia.

Las cantidades binarias (1) que se resaltan en la tabla 9, indican que la electrobomba de llenado (Q1) se encuentra prendida, debido a que los contactos I2, t1 y M1 se encuentran cerrados; sin embargo, para que el contacto M1 se pueda enclavar, es necesario presionar primero el pulsador I1. Entonces, en la tabla 9, las cantidades binarias que dan a conocer el estado de la electrobomba de llenado (Q1), se han obtenido haciéndose uso de la ecuación (26), es decir:

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = Q1. \quad (26)$$

$$1 * (1 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$0 * (0 + 0) * 0 = 0.$$

$$1 * (0 + 0) * 1 = 0.$$

Las cantidades binarias (1) que se resaltan en la tabla 10, indican que la electrobomba de vaciado (Q2) se encuentra prendida, debido a que los contactos I4, t2 y M2 se encuentran cerrados; no obstante, para que el contacto M2 se pueda enclavar, es necesario presionar primero el pulsador I3. Entonces, en la tabla 10, las cantidades binarias que dan a conocer el estado de la electrobomba de llenado (Q2), se han obtenido haciéndose uso de la ecuación (27), es decir:

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = Q2. \quad (27)$$

$$1 * (1 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$0 * (0 + 0) * 0 = 0.$$

$$1 * (0 + 0) * 1 = 0.$$

También de las figuras 15 y 16, se puede observar que el estado de los temporizadores TT1 y TT2, depende específicamente del estado de las bobinas internas M1 y M2; lo cual, también se puede verificar mediante las ecuaciones (21) y (24), respectivamente.

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = TT1. \quad (21)$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = TT2. \quad (24)$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

En la tabla 6, se puede observar que el mínimo (0.316 %) y máximo (0.782 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido en la operación de llenado, se obtuvieron en las pruebas 5 y 3, respectivamente. En la tabla 8, se puede observar que el mínimo (0.205 %) y máximo (1.384 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido en la operación de vaciado, se obtuvieron en las pruebas 4 y 5, respectivamente. Esto indica que el máximo error porcentual con respecto al volumen final de líquido, se obtiene en la operación de vaciado.

Arce y Arce (2012, pp. 75-80), realizaron siete pruebas en el tanque cilíndrico, de las cuales la primera fue de sólo llenado, la segunda y tercera de sólo vaciado y de la cuarta a la séptima en forma simultánea llenado y vaciado. Los resultados que obtuvieron, indican que el mínimo (0.668 %) y máximo (2.783 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido, corresponden a la tercera y sexta prueba, respectivamente.

Entonces, al confrontar los resultados que se muestran en las tablas 6 y 8, con los resultados obtenidos por Arce y Arce (2012, pp. 75-80), se puede decir que la información obtenida en el presente trabajo de tesis tiene un grado de confiabilidad mayor del 95 %; lo cual también prueba la validez de las ecuaciones (13) y (18), ya que el error porcentual máximo con respecto al volumen final de líquido en las operaciones de vaciado y llenado del tanque cilíndrico horizontal resultaron mucho menor del 5 %.

En esta investigación, se ha utilizado el cable de transmisión de datos (figura 3) con puertos COM y USB, los cuales se conectaron al relé programable y a la PC (laptop); de este modo los tiempos de llenado y vaciado se escribieron en la ventana de parámetros de los temporizadores TT1 y TT2 (figura 17), empleándose para esto el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2. De esta forma, el encendido de las electrobombas de llenado y vaciado se efectuó desde una PC (laptop), simplemente con realizar un clic sobre los contactos I1 e I3. Esto a su vez hizo posible, que se pueda ver en tiempo real, el estado de los temporizadores TT1 y TT2 y de las salidas físicas Q1 y Q2 del relé programable; lo cual demuestra que, mediante la implementación de dicho sistema automatizado, se ha podido realizar de manera eficiente el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- En el ítem 1.2.2, se determinó la relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal (ecuación **(12)**), la cual se adecuó a las ecuaciones **(12)** y **(18)** para determinar el volumen inicial de líquido y el valor experimental del volumen final de líquido, respectivamente; cumpliéndose de esta manera con el primer objetivo específico y juntamente verificándose la primera hipótesis específica. Además, en los resultados que se muestran en las tablas 5, 6, 7 y 8, se puede observar que cuanto mayor es el nivel de líquido, mayor es el volumen de líquido; por lo tanto, se concluye que existe una relación directa entre el volumen del líquido con el nivel de líquido.
- En la sección 1.2.8, se ha determinado la ecuación **(14)**, la misma que da a conocer la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y el volumen de llenado. También, en esta sección se ha determinado la ecuación **(17)**, la misma que representa a la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y el volumen de vaciado. De esta manera se ha logrado el segundo objetivo específico y simultáneamente se ha probado la segunda hipótesis específica. En los resultados que se indican en la tabla 5, se puede ver que cuanto mayor es el volumen inicial y el volumen de llenado, mayor es el volumen final; por lo tanto, se puede decir que existe una relación directa entre el volumen final con el volumen inicial y el volumen de llenado. En los resultados que se muestran en la tabla 7, se puede observar que cuanto mayor es el volumen inicial, mayor es el volumen final; sin embargo, se puede observar que cuanto mayor es el volumen de vaciado, menor es el volumen final; por lo tanto, se concluye que existe relación directa entre el volumen final con el volumen inicial y existe una relación inversa entre el volumen final con el volumen de vaciado.
- En la sección 1.2.5, se ha determinado la ecuación **(16)**, la cual indica que existe relación entre el tiempo con el volumen de llenado en un tanque cilíndrico horizontal. De la misma forma, en la sección 1.2.6, se ha determinado la ecuación **(17)**, la cual representa a la relación entre el tiempo con el volumen de vaciado. De este modo se ha alcanzado el tercer objetivo específico y a su vez se ha probado la tercera hipótesis específica. En los resultados que se muestran en la tabla 5, se

puede ver que cuanto mayor es el volumen de llenado, mayor es el tiempo que debe estar prendida la electrobomba de llenado; por lo tanto, existe una relación directa entre el tiempo de llenado con el volumen correspondiente. De la misma manera, en los resultados que se muestran en la tabla 7, se puede ver que cuanto mayor es el volumen de vaciado, mayor es el tiempo que debe estar prendida la electrobomba de vaciado; por lo tanto, existe una relación directa entre el tiempo de vaciado con el volumen correspondiente.

- En el ítem 3.1.3, se ha elaborado el circuito lógico (diagrama ladder) más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Al mismo tiempo, esto hizo posible determinar el número de entradas y salidas físicas que se utilizaron del relé programable, las cuales son: cuatro entradas y dos salidas físicas. De este modo, se cumplió con el cuarto objetivo específico y al mismo tiempo se comprobó la cuarta hipótesis específica.
- En el ítem 3.1.5, se muestra la determinación de la relación entre la condición de las entradas I1 e I2, el estado de la bobina interna M1, el estado del contacto t1 y el estado de la salida física Q1 del relé programable. En el mismo ítem, se ha hecho la determinación de la relación entre la condición de las entradas I3 e I4, el estado de la bobina interna M2, el estado del contacto t2 y el estado de la salida física Q2 del relé programable. De esta forma, se ha logrado el quinto objetivo específico y simultáneamente se ha probado la quinta hipótesis específica. Los resultados que se muestran en la tabla 9, revelan que la electrobomba de llenado (Q1) se encontrará prendida, siempre y cuando la bobina interna M1 se encuentre prendida; es decir, existe una relación directa entre el estado de Q1 con el estado de M1. Del mismo modo, los resultados que se indican en la tabla 10, dan a conocer que la electrobomba de vaciado (Q2) se encontrará prendida, necesariamente si M2 se encuentra prendida; es decir, existe una relación directa entre el estado Q2 con el estado de M2.
- De esta manera, se ha concluido la presente investigación, llegando al objetivo general y al mismo tiempo verificándose la hipótesis general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Para un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar las ecuaciones **(12)** y **(18)**, para determinar el valor inicial del volumen de líquido y el valor experimental del volumen final de líquido, respectivamente.
- Para determinar el tiempo de llenado en un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar la ecuación **(14)**, para lo cual se debe evaluar previamente el caudal que produce la electrobomba de llenado.
- Para determinar el tiempo de vaciado en un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar la ecuación **(15)**, para lo cual se debe evaluar previamente el caudal que produce la electrobomba de vaciado.
- En la operación de llenado de un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda hacer uso de la ecuación **(16)** cuando se evalué el valor teórico del volumen final de líquido, para lo cual se debe conocer previamente los valores del volumen inicial y de llenado.
- Para determinar el valor teórico del volumen final en la operación de vaciado de un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda hacer uso de la ecuación **(17)**, para lo cual se debe conocer previamente el volumen inicial de líquido y el volumen de vaciado.
- Es recomendable el uso del cable de transmisión de datos, cuando se realice el vaciado y llenado del tanque cilíndrico horizontal; de esta manera se podrá observar en tiempo real, el estado de las salidas físicas del relé programable, en las cuales se vinculan las electrobombas de llenado y vaciado.
- Con la finalidad de impedir percances que puedan perturbar el trabajo de las electrobombas de llenado y vaciado con el relé programable, es recomendable realizar una inspección periódica a todos los dispositivos que conforman el sistema automatizado: relé programable, electrobombas de llenado y vaciado, llave térmica, conexiones eléctricas, pulsadores y luces led, etc.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

- ARCE, Fredy y ARCE, Aldo. Diseño, construcción e instalación de un tanque cilíndrico horizontal, para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo en la FIQ-UNAP. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2013. pp. 1-120.
- 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. pp. xii, 21, 31-34, 39-73.
- CUCAT, Yuan. Implementación de una plataforma de capacitación en control industrial para los alumnos de ingeniería electrónica - UNPRG. Tesis para optar el título profesional de ingeniero electrónico. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, 2020. pp. 16-17.
- DEL ÁGUILA, Jesús y HAQUIWARA, Irma. Diseño, construcción e instalación de un prototipo con controlador lógico programable para automatizar el tiempo de funcionamiento de cuatro electrobombas. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2022. pp. 6, 14.
- 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.
- FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Principios elementales de los procesos químicos. 4a. ed. México: Limusa Wiley, 2018. 546 p.

ISBN: 978-607-05-0852-3.

- 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. 8-10, 15, 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. 19 p.
- JARA, Johnny y RAMOS, Jhon. Diseño y construcción de un prototipo automatizado de un sistema de bombeo de agua para riego pecuario y consumo humano utilizando energía fotovoltaica. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, 2018. pp. xi, 99-101.
- MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 7a. ed. México: Pearson Educación, S.A, de C.V., 2015. pp. 120, 141.
ISBN: 978-607-32-3288-3.
- RODRÍGUEZ, Julián; CERDÁ, Luis y BEZOS, Roberto. Automatismos Industriales. 2a. ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2022. pp. 2, 7, 313.
ISBN 13: 978-84-1366-161-2.
- VENERO, Armando. Análisis Matemático 2. 1a. ed. digital. Lima, Perú: Ediciones Gemar, 2020. 682 p.
ISBN DIGITAL: 978-612-45216-6-9.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿Cuál es el sistema automatizado más adecuado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Existirá alguna relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal? • ¿Existirá alguna relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal? • ¿Existirá alguna relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal? • ¿Cuál es el circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal? • ¿Existirá alguna relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable? 	<p>Objetivo general Implementar un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal. • Determinar la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal. • Determinar la relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal. • Elaborar el circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal. • Determinar la relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable 	<p>Hipótesis general El sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, debe estar implementado con un relé programable el cual debe contar con cuatro entradas y dos salidas físicas.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sí, existe relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal. • Sí, existe relación entre el volumen final de líquido, el nivel inicial de líquido y los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal. • Sí, existe relación entre el tiempo, con los volúmenes de llenado y vaciado en un tanque cilíndrico horizontal. • El circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, debe ser un diagrama tipo ladder. • Sí, existe relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de cada una de las salidas físicas del relé programable. 	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES En el control automático I1, I2, I3 e I4: condición de las entradas del relé en las que se conectan los pulsadores I1, I2, I3 e I4. En el llenado h_i: nivel inicial de líquido. V_{LL}: volumen de llenado. En el vaciado h_i: nivel inicial de líquido. V_V: volumen de vaciado.</p> <p>VARIABLES INTERVINIENTES En el llenado y vaciado V_i: volumen inicial de líquido. $h_{f(Ex)}$: altura final de líquido.</p> <p>VARIABLES DEPENDIENTES En el control automático Q1 y Q2: estado de las salidas físicas del relé que se conectan a la electrobomba de llenado y a la electrobomba vaciado. En el llenado V_f: volumen final de líquido. t_{LL}: tiempo de llenado. En el vaciado V_f: volumen final de líquido. t_V: tiempo de vaciado.</p>	<p>Abierto: 0 Cerrado: 1</p> <p>m, cm m^3, L</p> <p>m, cm m^3, L</p> <p>m^3, L</p> <p>m, cm</p> <p>Apagado: 0 Prendido: 1</p> <p>m^3, L</p> <p>min, s</p> <p>m^3, L</p> <p>min, s</p>	<p>Tipo de investigación La presente investigación es aplicada con enfoque cuantitativo y diseño correlacional.</p> <p>Población En el control automático Está conformada por la cantidad total de elementos del diagrama ladder.</p> <p>En el llenado y vaciado Lo constituyen la cantidad total de pruebas de funcionamiento que se pueden realizar en el sistema automatizado.</p> <p>Muestra En el control automático El tipo de muestreo es el no probabilístico a criterio o conveniencia de los investigadores, para lo cual se ha considerado que la muestra está conformada por las salidas físicas (Q1 y Q2); por lo tanto, el tamaño de muestra es igual a dos (2).</p> <p>En el llenado y vaciado A criterio de los investigadores, se ha determinado que el tamaño de muestra es igual a diez (10); es decir, se realizaron cinco (5) pruebas para el llenado y cinco (5) pruebas para el vaciado.</p>

Anexo 2. Hoja de cálculo para la operación de llenado.

=0\$5*(((D6-\$N\$5)*(\$N\$5^2)-((D6-\$N\$5)^2)^0.5)+(\$N\$5^2)*ASENO((D6-\$N\$5)/\$N\$5)+(PI()/2)*(\$N\$5^2)																
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2																
3	Prueba	h_i		V_i	V_{LL}	$V_{f(T)}$	t_{LL}			Q_E	R_T	L_T				
4	Nº	cm	m	m^3	L	L	L	min	s		L/min	m^3/s	m	m		
5	1	9.8	0.098	0.02716	27.16	40	67.16	1.351	81.1		29.6	0.000493	0.25	1		
6	2	18.5	0.185	0.06604	66.04	45	111.04	1.520	91.2							
7	3	26.6	0.266	0.10617	106.17	30	136.17	1.014	60.8							
8	4	22.4	0.224	0.08520	85.20	38	123.20	1.284	77.0	$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$						
9	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	45	104.34	1.520	91.2							
10																
11	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error				$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$						
12	Nº	cm	m	m^3	L	L	%			$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$						
13	1	18.8	0.188	0.06750	67.50	67.16	0.501			$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$						
14	2	27.5	0.275	0.11065	110.65	111.04	0.352									
15	3	32.5	0.325	0.13510	135.10	136.17	0.782									
16	4	29.9	0.299	0.12252	122.52	123.20	0.553									
17	5	26.3	0.263	0.10467	104.67	104.34	0.316									
18																

Anexo 3. Hoja de cálculo para la operación de vaciado.

E5																
= \$O\$4*((D5-\$N\$4)*(\$N\$4^2)-((D5-\$N\$4)^2)^0.5)+(\$N\$4^2)*ASENO((D5-\$N\$4)/\$N\$4)+(PI()/2)*(\$N\$4^2)																
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																
2	Prueba	h_i		V_i	V_V	$V_{f(T)}$	t_V				Q_s		R_T	L_T		
3	Nº	cm	m	m ³	L	L	L	min	s		L/min	m ³ /s	m	m		
4	1	25.7	0.257	0.10167	101.67	30	71.67	0.980	58.8		30.6	0.000510	0.25	1		
5	2	38.5	0.385	0.16223	162.23	40	122.23	1.307	78.4							
6	3	29.7	0.297	0.12154	121.54	45	76.54	1.471	88.2	$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$						
7	4	33.4	0.334	0.13937	139.37	44	95.37	1.438	86.3							
8	5	24.4	0.244	0.09518	95.18	35	60.18	1.144	68.6							
9																
10	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error										
11	Nº	cm	m	m ³	L	L	%									
12	1	19.5	0.195	0.07090	70.90	71.67	1.083									
13	2	29.7	0.297	0.12154	121.54	122.23	0.571									
14	3	20.5	0.205	0.07580	75.80	76.54	0.965									
15	4	24.4	0.244	0.09518	95.18	95.37	0.205									
16	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	60.18	1.384									
17																
18																

Anexo 4. Vistas de las pruebas de funcionamiento del sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.





Anexo 5. Especificaciones técnicas de los componentes principales del sistema automatizado.

Electrobombas de llenado y vaciado

Marca: Botts.

Voltaje: 220 VAC.

Potencia: 0.37 kW.

Caudal máximo: 40 L/min.

Altura dinámica máxima: 40 m.

Frecuencia: 60 Hz.

Relé programable

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.

Anexo 6. Manual de instrucciones para el uso del sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

Operaciones de llenado y vaciado

Para realizar el llenado con una determinada cantidad de volumen de líquido en el tanque cilíndrico horizontal, el procedimiento será el siguiente:

- Se debe hacer una inspección al visor con regla graduada, para determinar el nivel inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación **(13)** en Microsoft Excel 2023, se puede escribir en una celda el valor de h_i y determinar de forma automática el valor del volumen correspondiente (V_i) (figura A1).
- A continuación, se debe escribir en otra celda la cantidad de volumen de líquido que se desea llenar (V_{LL}). Entonces, haciendo uso de las ecuaciones **(14)** y **(16)**, se determinan el tiempo de llenado (t_{LL}) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente (figura A1).
- El valor del tiempo de llenado se programa en el relé, el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de llenado presionando el pulsador verde I1 (NA), en ese mismo instante el relé programable mandará una señal eléctrica a la electrobomba de llenado (EBL) haciendo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led verde que está conectada a la salida física Q1), permitiendo de este modo que el líquido que está contenido en el tanque reservorio empiece a fluir por toda la línea de llenado hasta el tanque cilíndrico horizontal, durante todo el tiempo programado (véase también la figura A1). Cuando el temporizador termine de contar el tiempo programado, el relé programable mandará otra señal eléctrica a la electrobomba de llenado (EBL) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led verde). En cualquier momento que se desee u ocurra algún inconveniente, se puede presionar el pulsador rojo I2 (NC), apagando a la electrobomba de llenado (véase las figuras A3, A4 y A5).

Para realizar el vaciado de una determinada cantidad de volumen de líquido en el tanque cilíndrico horizontal, el procedimiento será el siguiente:

- Se debe hacer una inspección al visor con regla graduada, para determinar el nivel inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación **(13)** en

Microsoft Excel 2023, se puede escribir en una celda el valor de h_i y determinar de forma automática el valor del volumen correspondiente (V_i) (figura A2).

- A continuación, se debe escribir en otra celda la cantidad de volumen de líquido que se desea vaciar (V_V). Entonces, haciendo uso de las ecuaciones (15) y (17), se determinan el tiempo de vaciado (t_V) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente (figura A2).
- El valor del tiempo de vaciado se programa en el relé (figuras A3 y A4), el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de vaciado presionando el pulsador verde I3 (NA), en ese mismo instante el relé programable mandará una señal eléctrica a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led roja que está conectada a la salida física Q2), permitiendo de este modo que el líquido que está contenido en el tanque cilíndrico horizontal empiece a fluir por toda la línea de vaciado hasta el tanque reservorio, durante todo el tiempo programado (véase también la figura A1). Cuando el temporizador termine de contar el tiempo programado, el relé programable mandará otra señal eléctrica a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led roja). En cualquier momento que se desee u ocurra algún inconveniente, se puede presionar el pulsador rojo I4 (NC), apagando a la electrobomba de vaciado (véase las figuras A3, A4 y A5).

Es preciso mencionar que los pulsadores I2 e I4, físicamente son contactos normalmente cerrados (NC); sin embargo, en el software de simulación del relé se les programa como contactos normalmente abiertos (NA) (figura A6). También, al finalizar dichas operaciones, se debe hacer nuevamente la inspección al visor para medir el nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$), cuyo valor se debe reemplazar en la ecuación (18) para determinar el valor experimental del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$). En las figuras A4 y A5, se muestran en detalle los componentes que conforman el sistema automatizado.

Orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable

En concordancia a lo que se muestra en el diagrama ladder (figura A6), se estableció el siguiente orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable:

- Los pulsadores I1 (NA) e I2 (NC), se enchufan a las entradas 1 y 2 del relé programable, respectivamente.
- Los pulsadores I3 (NA) e I4 (NC), se enchufan a las entradas 3 y 4 del relé programable, respectivamente.
- A la salida física Q1 del relé programable, se enchufan la electrobomba de llenado (EBL) y la luz led verde.
- A la salida física Q2 del relé programable, se enchufan la electrobomba de vaciado (EBV) y la luz led roja.

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$$

Donde:

V_{LL} = volumen de llenado, m³, L.

Q_E = caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal, m³/s, L/min.

$$t_V = \frac{V_V}{Q_S}. \quad (15)$$

Donde:

V_V = volumen de vaciado, m³, L.

Q_S = caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal, m³/s, L/min.

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$$

Para el vaciado:

$$V_{f(T)} = V_i - V_V. \quad (17)$$

Para el llenado y vaciado:

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

E6 X ✓ fx =\\$O\\$5*(((D6-\\$N\\$5)*((\\$N\\$5^2)-((D6-\\$N\\$5)^2))^0.5)+(\\$N\\$5^2)*ASENO((D6-\\$N\\$5)/\\$N\\$5)+(PI()/2)*(\\$N\\$5^2)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2																
3	Prueba	h_i		V_i	V_{LL}	$V_{f(T)}$	t_{LL}				Q_E	R_T	L_T			
4	N°	cm	m	m ³	L	L	L	min	s		L/min	m ³ /s	m	m		
5	1	9.8	0.098	0.02716	27.16	40	67.16	1.351	81.1		29.6	0.000493	0.25	1		
6	2	18.5	0.185	0.06604	66.04	45	111.04	1.520	91.2							
7	3	26.6	0.266	0.10617	106.17	30	136.17	1.014	60.8							
8	4	22.4	0.224	0.08520	85.20	38	123.20	1.284	77.0							
9	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	45	104.34	1.520	91.2							
10																
11	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error										
12	N°	cm	m	m ³	L	L	%									
13	1	18.8	0.188	0.06750	67.50	67.16	0.501									
14	2	27.5	0.275	0.11065	110.65	111.04	0.352									
15	3	32.5	0.325	0.13510	135.10	136.17	0.782									
16	4	29.9	0.299	0.12252	122.52	123.20	0.553									
17	5	26.3	0.263	0.10467	104.67	104.34	0.316									
18																

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$$

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$$

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

Figura A1. Hoja de cálculo para la operación de llenado.

=SOS4*(((D5-\$N\$4)*(\$N\$4^2)-((D5-\$N\$4)^2))^0.5)+(\$N\$4^2)*ASENO((D5-\$N\$4)/\$N\$4)+(PI()/2)*(\$N\$4^2)																
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																
2	Prueba	h_i		V_i	V_V	$V_{f(T)}$	t_v				Q_s		R_T	L_T		
3	N°	cm	m	m ³	L	L	L	min	s		L/min	m ³ /s	m	m		
4	1	25.7	0.257	0.10167	101.67	30	71.67	0.980	58.8		30.6	0.000510	0.25	1		
5	2	38.5	0.385	0.16223	162.23	40	122.23	1.307	78.4							
6	3	29.7	0.297	0.12154	121.54	45	76.54	1.471	88.2	$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$						
7	4	33.4	0.334	0.13937	139.37	44	95.37	1.438	86.3							
8	5	24.4	0.244	0.09518	95.18	35	60.18	1.144	68.6							
9																
10	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error										
11	N°	cm	m	m ³	L	L	%									
12	1	19.5	0.195	0.07090	70.90	71.67	1.083				$V_{f(T)} = V_i - V_V. \quad (17)$					
13	2	29.7	0.297	0.12154	121.54	122.23	0.571									
14	3	20.5	0.205	0.07580	75.80	76.54	0.965			$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$						
15	4	24.4	0.244	0.09518	95.18	95.37	0.205									
16	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	60.18	1.384									
17																
18																

Figura A2. Hoja de cálculo para la operación de vaciado.



Figura A3. Equipo para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, después de la implementación del sistema automatizado.

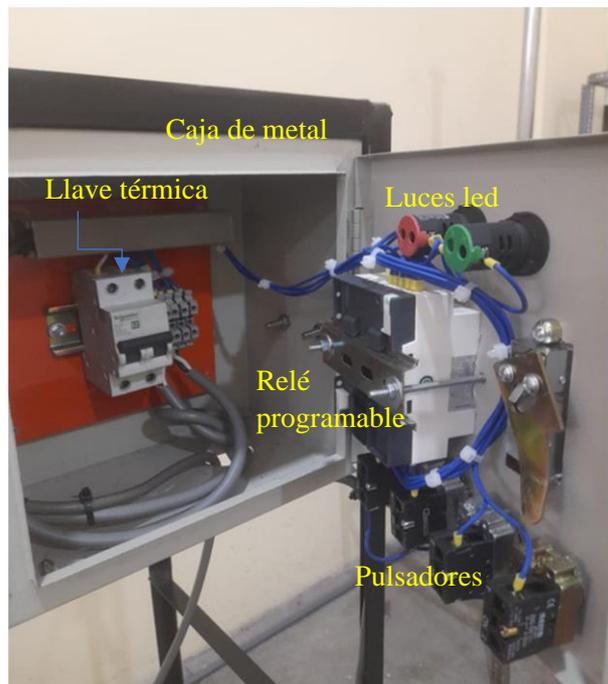
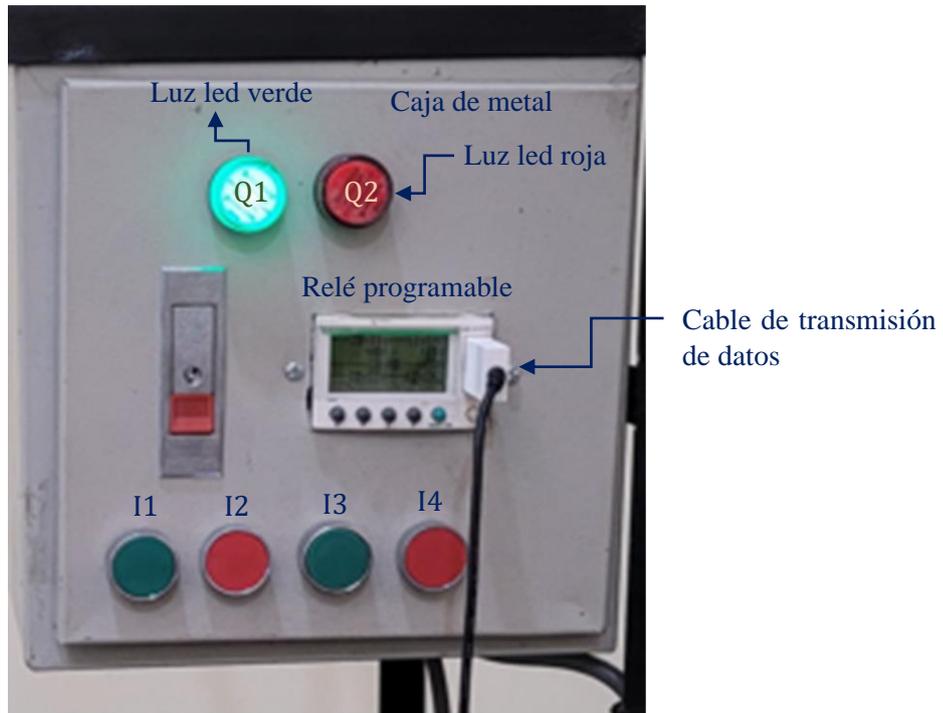


Figura A4. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado.

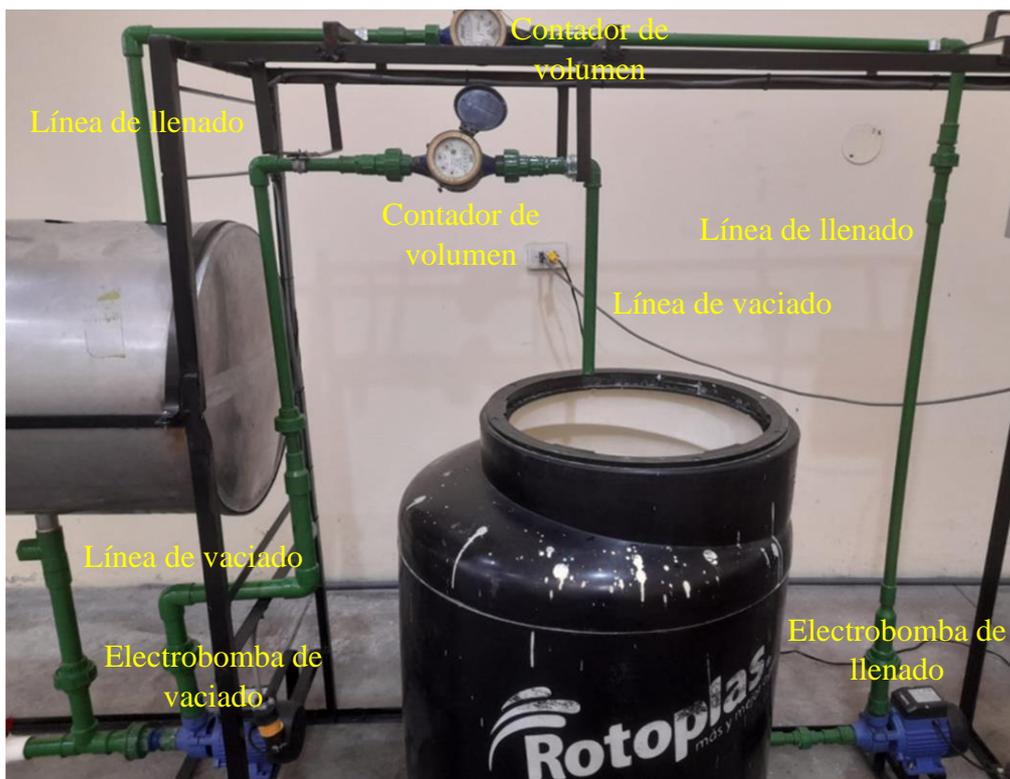


Figura A5. Vistas reales de las líneas de vaciado y llenado.

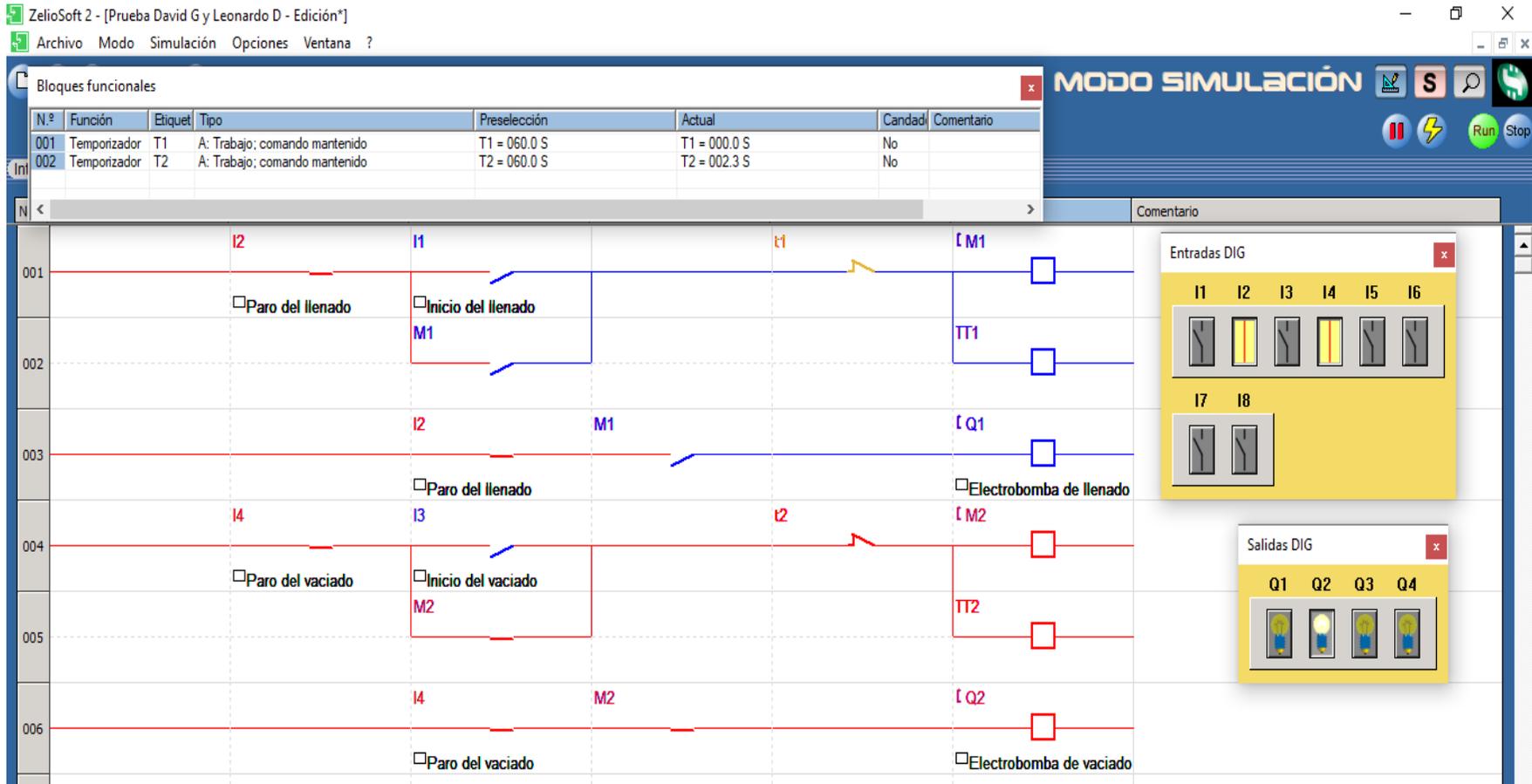


Figura A6. Diagrama ladder para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.