



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**MEJORAMIENTO DE UN EQUIPO PARA EL DRENAJE DE LÍQUIDOS
EN TANQUES CÓNICOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA AUTOMATIZADO**

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

PRESENTADO POR:

**NAOMI GIANELLA ESTRELLA GUERRA
JAHIEL ALEXANDER PANDURO PAREDES**

ASESORES:

**Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.**

IQUITOS, PERÚ

2023



UNAP

Facultad de Ingeniería Química
Unidad de Investigación

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 012 -CGT-FIQ-UNAP-2023

En Iquitos, en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Química, a los 11 días del mes de diciembre de 2023, a horas 11:00, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **"MEJORAMIENTO DE UN EQUIPO PARA EL DRENAJE DE LÍQUIDOS EN TANQUES CÓNICOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO"**, aprobado con Resolución Decanal N° 262-2023-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Naomi Gianella Estrella Guerra y Jahel Alexander Panduro Paredes**, 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° 257-2023-FIQ-UNAP está integrado por:

Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.	Presidente
Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CÉSPEDES, Mgr.	Miembro
Ing. KARENTH ELENA RAMÍREZ ÁLVAREZ, 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 11:59 se dio por terminado el acto de sustentación.

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

Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CÉSPEDES, Mgr.
Miembro

Ing. KARENTH ELENA RAMÍREZ ÁLVAREZ, MSc.
Miembro

Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.
Asesor

Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor



JURADO Y ASESORES



.....
Ing. HUGO EMERSON FLORES BERNUY, Dr.

Presidente de Jurado



.....
Ing. ALCIDES ARMANDO DELGADO CÉSPEDES, Mgr.

Miembro



.....
Ing. KARENTH ELENA RAMÍREZ ÁLVAREZ, MSc.

Miembro



.....
Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Dr.

Asesor



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

Asesor

RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD

NOMBRE DEL TRABAJO

**FIQ_TESIS_ESTRELLA GUERRA_PANDUR
O PAREDES.pdf**

AUTOR

**ESTRELLA GUERRA / PANDURO PAREDE
S**

RECUESTO DE PALABRAS

14488 Words

RECUESTO DE CARACTERES

68305 Characters

RECUESTO DE PÁGINAS

63 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.4MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 15, 2023 7:36 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 15, 2023 7:37 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
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 17% Base de datos de trabajos entregados

● **Excluir del Reporte de Similitud**

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

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
JURADO Y ASESORES	iii
RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Bases teóricas	6
1.2.1. Ecuación de continuidad	6
1.2.2. Ecuación general de la energía	7
1.2.3. Número de Reynolds	9
1.2.4. Ecuación de Darcy Weisbach	10
1.2.5. Ecuaciones para el factor de fricción	10
1.2.6. Pérdidas menores	11
1.2.7. Sistema automatizado	13
1.3. Definición de términos básicos	17
1.3.1. Contacto normalmente abierto (NA)	17
1.3.2. Contacto normalmente cerrado (NC)	18
1.3.3. Enclavamiento o retención	18
1.3.4. Temporizadores	19
1.3.5. Variables de control automático	20
1.3.6. Variables de la operación de drenaje	20
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	23
2.1. Formulación de la hipótesis	23
2.2. Variables y su operacionalización	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	27
3.1. Tipo y diseño	27
3.1.1. Esquema para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado	29
3.1.2. Deducción del modelo matemático que permite determinar el tiempo para drenar una	

cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos	32
3.1.3. Diseño del diagrama ladder para la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos	38
3.1.4. Determinación de los componentes del diagrama ladder	41
3.1.5. Obtención del sistema de ecuaciones, que relaciona el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador	41
3.1.6. Montaje e instalación del sistema automatizado para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos	42
3.2. Diseño muestral	46
3.3. Procedimientos de recolección de datos	47
3.4. Procesamiento y análisis de datos	50
3.5. Aspectos éticos	51
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	52
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	59
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	60
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	61
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	62
ANEXOS	64
Anexo 1. Matriz de consistencia	65
Anexo 2. Hoja de cálculo para la determinación del factor de fricción promedio	66
Anexo 3. Hoja de cálculo para la prueba 1	67
Anexo 4. Hoja de cálculo para la prueba 2	68
Anexo 5. Hoja de cálculo para la prueba 3	69
Anexo 6. Hoja de cálculo para la prueba 4	70
Anexo 7. Hoja de cálculo para la prueba 5	71
Anexo 8. Hoja de cálculo para la prueba 6	72
Anexo 9. Hoja de cálculo para la prueba 7	73
Anexo 10. Hoja de cálculo para la prueba 8	74
Anexo 11. Vistas de las pruebas de funcionamiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos	75
Anexo 12. Especificaciones técnicas de los componentes del sistema automatizado	76
Anexo 13. Manual de instrucciones del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos	77

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resistencia de válvulas y accesorios expresadas como longitud equivalente	13
Tabla 2. Operacionalización de las variables en el control automático	25
Tabla 3. Operacionalización de las variables en la operación de drenaje	26
Tabla 4. Dimensiones del tanque cónico y de la tubería de descarga	47
Tabla 5. Datos necesarios para determinar el factor de fricción promedio	48
Tabla 6. Determinación del factor de fricción promedio	49
Tabla 7. Determinación de la cantidad β	50
Tabla 8. Resultados teóricos de las variables intervinientes	52
Tabla 9. Evaluación de la cantidad Y	52
Tabla 10. Resultados del tiempo programado en el sistema automatizado	54
Tabla 11. Comparación de resultados para el nivel final de líquido	55
Tabla 12. Comparación de resultados para el volumen final de líquido	55
Tabla 13. Comparación de resultados para el volumen de drenaje	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos de fluido utilizados en la ecuación de continuidad	6
Figura 2. Sistema de flujo de fluido que representa la ecuación general de la energía	8
Figura 3. Coeficientes de resistencia de entrada	12
Figura 4. Relé programable con ocho entradas y cuatro salidas físicas	14
Figura 5. Sistema de ecuaciones lógicas representado mediante un diagrama ladder	15
Figura 6. Interfaz de comunicación entre una PC y el relé programable	16
Figura 7. Válvula solenoide	17
Figura 8. Representaciones de un contacto NA en el software de programación del relé	17
Figura 9. Representaciones de un contacto NC en el software de programación del relé	18
Figura 10. Diagrama ladder de un enclavamiento o retención	19
Figura 11. Diagrama de estado para los elementos de un enclavamiento o retención	19
Figura 12. Esquema del diseño de investigación para el control automático	27
Figura 13. Esquema del diseño de investigación para la operación de drenaje	28
Figura 14. Equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, antes de ser implementado con el sistema automatizado	29
Figura 15. Esquema de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, al ser implementado mediante un sistema automatizado	31
Figura 16. Detalle del sistema automatizado	32
Figura 17. Diseño del diagrama ladder	39
Figura 18. Simulación del diagrama ladder	40
Figura 19. Ventana de parámetros del temporizador	41
Figura 20. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado	43
Figura 21. Diagrama de instalación eléctrica	44
Figura 22. Vista real del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, después de ser implementado mediante el sistema automatizado	45
Figura 23. Monitorización de la operación de drenaje	58

RESUMEN

El objetivo general de la presente investigación fue: realizar el mejoramiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, mediante la implementación de un sistema automatizado; deduciéndose primeramente el modelo matemático mediante el cual se determinó el tiempo para drenar una cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos, aplicándose para esto la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía. A continuación, se realizó el montaje del sistema automatizado, el cual estuvo conformado por los siguientes componentes: un relé programable, el software Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y una llave térmica con su enchufe bipolar. Finalmente, al instalarse dicho sistema automatizado en el tanque cónico, se realizaron ocho (8) pruebas de funcionamiento, en las mismas que se determinaron el tiempo programado en el sistema automatizado, el cual resultó: 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. También, se obtuvieron los siguientes resultados, con respecto al máximo porcentaje de error, del nivel final de líquido, del volumen final de líquido y del volumen de drenaje, los cuales fueron: 1.27 %, 3.85 % y 2.02 %, respectivamente; probándose de esta manera, que al aplicar dicho modelo matemático se obtienen resultados con una confiabilidad mayor al 95 %. De esta manera se concluye la presente investigación, cumpliéndose con el objetivo general y probándose la hipótesis general.

Palabras claves: tanque cónico, drenaje de líquidos, sistema automatizado, tiempo programado, nivel de líquido, volumen de líquido, volumen de drenaje.

ABSTRACT SUMMARY

The objectify general of the present investigation it was: accomplishing the improvement of the team for the liquids drain in conical tanks, by means of the development of a system automated; being deduced firstly the intervening mathematical model which determined the passage of time to drain a certain quantity of liquid volume in conical tanks itself, Being applicable ad hoc the equation of continuity and the general equation of energy. From now on, the frame-up of the automated system came true, which was shaped by the following components: A programmable relay, the software Zelio Soft2 V5.4.2, the interface of communication, a valve solenoid, a red push-button NC, a green push-button NA, an indicating rookie pilot and a thermic key with its bipolar plug. At last, when moved in the aforementioned system automated in the conical tank, eight (8) performance testings, in the same ones that were determined the passage of time programmed in the automated system came true, which worked out: 58.6 s, 56.2 s, 59.1 s, 50.6 s, 49.0 s, 67.4 s, 59.5 s and 54.5 s, respectively. Also, they obtained the following results, regarding the maximum percentage of error, of the final level of liquid, of the final volume of liquid and of the draining volume, which were: 1.27 %, 3.85 % and 2.02 %, respectively, trying on this way, that to apply said mathematical model they obtain to the 95 % results with a bigger reliability. The present investigation this way is concluded, coming true with the objectify general al and trying on his general hypothesis.

Keywords: conical tank, liquids drainage, automated system, programmed time, level of liquid, liquid volume, draining volume.

INTRODUCCIÓN

En el año 2012 en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), realizaron el trabajo de tesis titulado: Diseño, construcción e instalación de un equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos (Flores, López y Menéndez, 2012, pp. ii, 1-74). En la actualidad este equipo se encuentra inservible, ya que no cuenta con ninguno de los componentes del sistema mediante el cual se realizaba el control automático del drenaje de líquidos (véase la figura 14), imposibilitando de esta manera realizar las prácticas de los cursos de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos, particularmente en lo que se refiere al control automático de procesos en régimen transitorio, lo que genera una deficiencia con respecto a la formación académica del estudiante de la FIQ-UNAP; pues no estaría desarrollando todas las competencias que se requiere al haber aprobado los mencionados cursos.

Los cursos de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos, cumplen una función muy importante en la formación de todo ingeniero químico, pues proporcionan los fundamentos necesarios para realizar el diseño e instrumentación de equipos requeridos en la industria de procesos y generación de energía. Por ejemplo, cuando se desee realizar el drenaje de una determinada cantidad de volumen de un líquido en un tanque con geometría determinada (cilíndrico o cónico), se debe determinar el tiempo que dura esta operación para que mediante un sistema automatizado se verifique que la válvula de descarga esté abierta todo este tiempo. Esto implica que se tenga que aplicar las ecuaciones de continuidad y balance general de energía, para obtener una ecuación que relacione el tiempo que durará la operación de drenaje con el nivel inicial de líquido y el volumen de líquido que se desea drenar en dichos tanques. Téngase en cuenta, que el tiempo sería la variable dependiente y el nivel inicial con el volumen que se desea drenar serían las variables independientes.

De esta manera, es que, en el presente trabajo de tesis, se plantea la siguiente interrogante general: ¿cuál es el sistema automatizado a implementarse para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos?

En este sentido, se formulan a continuación, los siguientes problemas específicos:

Problemas específicos

- ¿Existirá alguna relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico?
- ¿Existirá alguna relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico?
- ¿Cuáles son los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos?
- ¿Existirá algún sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionen el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador?

Entonces, correspondientemente al problema general y a los problemas específicos, se generan el objetivo general y los objetivos específicos.

Objetivo general

Realizar el mejoramiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, mediante la implementación de un sistema automatizado.

Objetivos específicos

- Determinar la relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico.
- Determinar la relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico.
- Determinar los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos.
- Obtener el sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionen el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador.

La presente investigación es importante, porque será un aporte a la implementación de los laboratorios de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), el mismo que permitirá mejorar las condiciones de aprendizaje cuando se realicen las clases teóricas y prácticas en dichos cursos; generándose de esta manera nuevas destrezas referidas al diseño, simulación, automatización y control de procesos industriales, en los docentes, alumnos y egresados de la FIQ-UNAP, lo cual se verá reflejado en la mejora académica, ubicándoles al mismo nivel competitivo con profesionales egresados de las universidades más reconocidas del país como la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM).

La estructura de esta 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

- Espinoza y Pezo (2023, pp. xiv, 1-77), desarrollaron el trabajo de tesis cuyo objetivo general fue: “determinar la relación entre la altura dinámica y el caudal en una electrobomba periférica”, para lo cual diseñaron y construyeron un equipo donde realizaron nueve (9) pruebas de funcionamiento y obtuvieron los valores experimentales del caudal y la altura dinámica de la electrobomba TWP13706, de los cuales realizaron la regresión polinómica de segundo grado para obtener la siguiente ecuación: $h_{EB} = 0.0031Q^2 - 1.016Q + 35.544$, $R^2 = 0.9972$. Dicha ecuación representó a la relación entre la altura dinámica y el caudal para la electrobomba TWP13706, siendo Q y h_{EB} el caudal producido y la altura dinámica de la electrobomba TWP13706, los cuales debían expresarse en L/min y m, respectivamente. Al final demostraron que los valores experimentales del caudal y la altura dinámica de la electrobomba TWP13706, se ajustan de manera casi perfecta a una ecuación polinómica de segundo grado, lo cual se indicó mediante el resultado del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9972$), con lo cual cumplieron el objetivo general y a la vez probaron la hipótesis general.
- Niño y García (2021, pp. 3-165), realizaron el trabajo de tesis titulado: “Diseño y optimización del sistema de drenaje de las aguas pluviales de la urbanización El Chilcal”. En esta tesis buscaron desarrollar un sistema óptimo y funcional en la cuenca El Chilcal, con el fin de facilitar la conducción de las aguas pluviales de manera segura, para evitar los daños que estas puedan ocasionar a las viviendas y a las vías. Para esto, realizaron la nivelación topográfica de toda la cuenca, trazándose de esta forma las subcuencas y las direcciones de los flujos de escorrentía, lo cual les permitió determinar el punto de convergencia de las aguas de lluvia y les facilitó la determinación del caudal de diseño de todas las estructuras de drenaje. Los parámetros que emplearon en el diseño fueron: la intensidad de las lluvias, el tiempo de concentración, área de drenaje y los criterios de la norma de drenaje pluvial urbano OS. 060. También tuvieron que rediseñar todo el sistema de drenaje, seleccionando las bombas adecuadas para que trabajen a partir de un nivel de inundación el cual no genere situaciones críticas las cuales

no afecten al sistema eléctrico. El sistema de funcionamiento de las bombas fue en paralelo y manual, los cuales ayudaron a seleccionar bombas de distintas capacidades y con la combinación de estas determinaron la capacidad máxima que requirieron en cada rango de inundación; para cual establecieron trabajar como máximo con una bomba de 400 L/s, una bomba de 300 L/s, dos bombas de 200 L/s y una bomba de 100 L/s. Durante los primeros tiempos de duración de una tormenta, donde el incremento de agua fue muy rápido, implementaron todas las bombas, ya que requirieron la capacidad máxima calculada de 1200 L/s y esto se expresó en el hito a partir de la cota de 28.007 m. s. n. m hasta 28.607 m. s. n. m. Posteriormente, cuando el incremento de la tormenta disminuyó, solo se apagó una bomba de 200 L/s y se dejaron en funcionamiento las demás, en el hito se indicó al disminuir la cota de 28.607 m. s. n. m hasta 28.557 m. s. n. m. Cuando ya no se generó un volumen de agua por la tormenta, solo mantuvieron prendida la bomba de 300 L/s y la de 100 L/s hasta alcanzar una cota de 28.00 m. s. n. m, debido a que a partir de este instante sólo se almacenó agua en el estanque. Por último, para evacuar el poco volumen de agua almacenado hicieron uso de la bomba de 100 L/s. De esta manera, concluyeron que el sistema de bombeo diseñado establece trabajar con bombas de diferentes capacidades, las cuales permitirán evacuar tormentas de diferentes magnitudes, garantizando de esta forma la evacuación pluvial de la cuenca El Chilcal, sin generar daños a las viviendas ni a los habitantes.

- [López \(2018, pp. 1-39\)](#), realizó el trabajo de tesis titulado: “Diseño, construcción y control de una planta de llenado y vaciado de tanques”. Este proyecto de tesis tuvo los siguientes objetivos: modelar matemáticamente la planta, seleccionar los componentes para su construcción, sintonizar su controlador, la simulación teórica y el control en tiempo real. El sistema de este proyecto estuvo conformado por dos tanques, de los cuales fluía agua de uno a otro a través de una válvula que se abría y se cerraba en relación al caudal requerido para mantener el nivel de líquido en el segundo tanque, del cual salía el fluido e ingresaba nuevamente al primer tanque, cerrando así el ciclo del flujo de líquido. Después que realizaron todas las conexiones y calibraciones de los sensores y válvula, utilizaron Simulink de Matlab para realizar el diagrama de bloques completo para Arduino, en la cual

aplicaron una entrada escalón, asignando el valor del nivel final que deseaban obtener, pero para eso tuvieron que sintonizar el controlador PID para determinar los valores de K_p , τ_i y τ_d , resultando los siguientes: 15, 80 y 4, respectivamente. De esta manera obtuvieron una respuesta rápida del controlador PID, con un sobre impulso de alrededor del 10 % y con un error nulo en régimen permanente.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación de continuidad

En referencia a la figura 1, la ecuación de continuidad establece que el flujo másico en la sección de área A_1 , debe ser igual al flujo másico en la sección de área A_2 (Mott, 2015, p. 120; citado por Espinoza y Pezo, 2023, p. 4), lo cual se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{m}_1 = \hat{m}_2. \quad (1)$$

Siendo \hat{m}_1 y \hat{m}_2 los flujos másicos correspondientes a las secciones de área A_1 y A_2 .

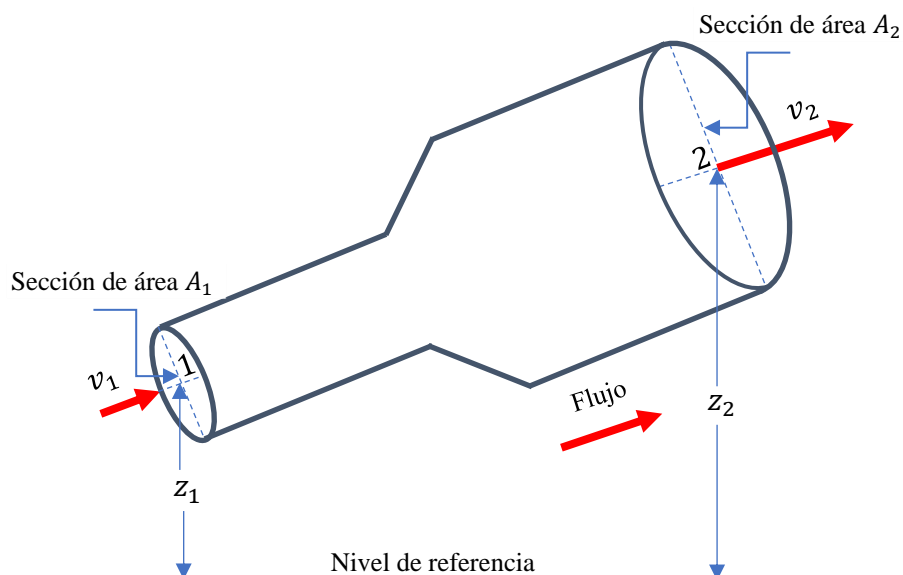


Figura 1. Elementos de fluido utilizados en la ecuación de continuidad.

Fuente: Espinoza y Pezo, 2023, p. 5.

El flujo másico de un fluido se denota como \hat{m} (kg/s) y es igual al producto del caudal por la densidad (Mott, 2015, p. 120; citado por Espinoza y Pezo, 2023, pp. 4-5), es decir: $\hat{m} = \rho Q$, siendo ρ la densidad del fluido en kg/m³ y Q el caudal en m³/s.

De la misma forma, el caudal o flujo volumétrico, es la multiplicación del área de la sección transversal a la dirección de flujo con la velocidad lineal promedio (Espinoza y Pezo, 2023, pp. 4-5), es decir: $Q = Av$, donde A es el área de la sección transversal a la dirección de flujo en m² y v es la velocidad lineal promedio en m/s. Entonces, de acuerdo a estas consideraciones la ecuación (1) queda:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2. \quad (2)$$

La ecuación (2), representa matemáticamente al principio de continuidad y se puede utilizar para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos, siempre y cuando el flujo sea estable en las secciones 1 y 2 (véase la figura 1) (Espinoza y Pezo, 2023, pp. 4-5).

En el caso que el fluido sea un líquido (fluido incompresible), las cantidades ρ_1 y ρ_2 de la ecuación (2) se consideran iguales, entonces la ecuación (2) se simplifica y queda:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2. \quad (3)$$

La ecuación (3), representa a la ecuación de continuidad para fluidos compresibles, la cual indica que, si en un conducto el flujo de fluido es constante, el caudal es igual en todas las secciones del conducto (Espinoza y Pezo, 2023, p. 6).

1.2.2. Ecuación general de la energía

Esta ecuación se fundamenta en la ecuación de Bernoulli, considerando adicionalmente las pérdidas y adiciones de energía, en la cual se utilizan elementos mecánicos como bombas, turbinas y una cantidad de accesorios los cuales generan pérdidas de energía por fricción (Díaz, 2018, p. 30). La energía que tiene el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, se denotan mediante E_1 y E_2 , respectivamente. Adicionalmente, se muestran las energías agregadas, removidas y perdidas, las cuales se denotan como: h_B , h_R y h_L , respectivamente (Díaz, 2018, p. 30; Espinoza y Pezo, 2023,

p. 6). De esta forma, la expresión de la ecuación general de energía, para el sistema de flujo que se muestra en la figura 2, se representa por la siguiente ecuación:

$$E_1 + h_B - h_R - h_L = E_2. \quad (4)$$

Donde:

h_B = energía por unidad de peso adicionada por la bomba, m.

h_R = energía por unidad de peso que se remueve del fluido por medio de un motor de fluido (turbina), m.

h_L = pérdidas de energía por unidad de peso de fluido en el sistema, que corresponden a la fricción y accesorios, m.

Según Espinoza y Pezo (2023, p. 6), la energía total que tiene el fluido por unidad de peso, se puede expresar en forma general mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}. \quad (5)$$

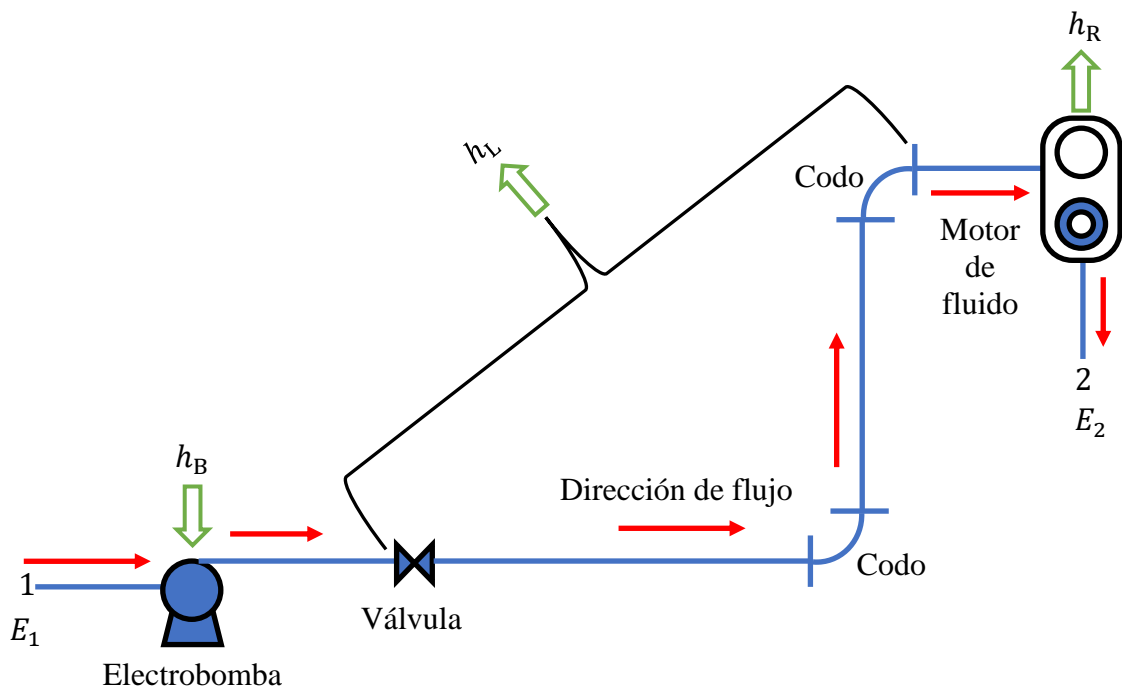


Figura 2. Sistema de flujo de fluido que representa la ecuación general de la energía.

Fuente: Espinoza y Pezo, 2023, p. 7.

Donde:

p = presión manométrica del fluido, N/m^2 .

γ = peso específico del fluido, N/m^3 .

z = altura o elevación, m.

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

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .

Combinando las ecuaciones (4) y (5), se obtiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_B - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (6)$$

La ecuación (6), es la representación matemática de la ecuación general de la energía para líquidos y téngase en cuenta que cada término de esta ecuación representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema (Mott, 2015, p. 159; citado por Espinoza y Pezo, 2023, pp. 7-8).

1.2.3. Número de Reynolds

El tipo de flujo en un conducto circular, se puede predecir mediante la evaluación de una cantidad adimensional denominada número de Reynolds (Espinoza y Pezo, 2023, p. 8; Saravia, 2019, p. 15; Díaz, 2018, p. 27). Se ha podido demostrar que el número de Reynolds, ya sea para flujo laminar o turbulento, depende de cuatro parámetros: la densidad del fluido (ρ), la viscosidad dinámica del fluido (μ), el diámetro de la tubería (D) y la velocidad lineal promedio del fluido (v) (Espinoza y Pezo, 2023, p. 8; Saravia, 2019, p. 15; Díaz, 2018, p. 27); dichos parámetros se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu}. \quad (7)$$

Donde:

N_R = número de Reynolds, adimensional.

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

ρ = densidad del fluido, kg/m³.

μ = viscosidad del fluido en Pa. s.

Si el flujo es laminar en una tubería circular recta, el número de Reynolds debe tener un valor menor que 2100; si el valor es mayor a 2100 y menor que 4000, el flujo es transitorio; y si el valor es superior a 4000, el flujo es turbulento (Espinoza y Pezo, 2023, p. 9; Saravia, 2019, p. 16; Díaz, 2018, p. 27).

1.2.4. Ecuación de Darcy Weisbach

La ecuación de Darcy Weisbach, sirve para evaluar la pérdida de energía por unidad de peso de fluido, debido a la fricción entre el fluido y el conducto por donde fluye (Espinoza y Pezo, 2023, p. 9; Bravo, 2020, p. 13). Dicha ecuación, indica que la pérdida de energía por unidad de peso de fluido (h_L), es directamente proporcional al factor de fricción, a la carga de velocidad del fluido y a la relación de longitud sobre el diámetro de la corriente de flujo (Espinoza y Pezo, 2023, p. 9; Díaz, 2018, p. 32), es decir:

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g}. \quad (8)$$

Donde:

h_L = pérdida de energía por unidad de peso de fluido debido a la fricción, m.

f = factor de fricción, (adimensional).

L = longitud de la tubería, m.

D = diámetro de la tubería, m.

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

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

1.2.5. Ecuaciones para el factor de fricción

Existen muchas ecuaciones que hacen posible la evaluación del factor de fricción, sólo una cubre el flujo laminar y las otras el flujo turbulento (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10; Bravo, 2020, pp. 14-16; Díaz, 2018, pp. 32-33). Entonces, para la zona de flujo laminar, donde $N_R < 2100$, el factor de fricción, se puede determinar con la ecuación siguiente:

$$f = \frac{N_R}{64}. \quad (9)$$

Si el valor del número de Reynolds está entre 2100 y 4000, el flujo es transitorio y es imposible predecir el valor de f (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10).

Para la zona de flujo turbulento, se puede utilizar las siguientes ecuaciones, dependiendo de los rangos de rugosidad relativa D/ε y número de Reynolds.

- **Ecuación de Blasius**

Sirve para evaluar el factor de fricción para flujo de fluidos en tuberías lisas (aluminio, latón, cobre, plomo, plástico, vidrio y asbesto-cemento), considerando un rango para el número de Reynolds entre 3000 y 10^5 (Bravo, 2020, pp. 14-16).

$$f = \frac{0.3164}{N_R^{0.25}}. \quad (10)$$

- **Ecuación de Swamee y Jain**

Esta ecuación permite la evaluación directa del factor de fricción, debido a que sólo es necesario reemplazar los valores del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10; Díaz, 2018, p. 33).

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}. \quad (11)$$

Para aplicar la ecuación (11), se debe tener en cuenta que los rangos de rugosidad relativa D/ε y número de Reynolds deben ser: de 100 hasta 1×10^6 y de 5×10^3 hasta 1×10^8 , respectivamente (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10).

1.2.6. Pérdidas menores

Las pérdidas de energía menores, se conocen también como pérdidas de energía en accesorios tales como válvulas, codos, tes, expansiones, contracciones, entradas y salidas de tuberías y equipos (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10; Bravo, 2020, p. 18).

En este caso, los valores experimentales de las pérdidas de energía se expresan en función de un coeficiente de resistencia K y de la carga de velocidad (Espinoza y Pezo, 2023, p. 10), es decir:

$$h_L = K \frac{v^2}{2g}. \quad (12)$$

Donde h_L representa la pérdida menor en m, K el coeficiente de resistencia sin dimensiones y v la velocidad lineal promedio del fluido en la tubería en m/s.

- **Pérdida de entrada**

Un caso muy común de pérdida de energía menor, se genera cuando un fluido fluye desde un depósito o tanque relativamente grande hacia una tubería. Esto indica que el fluido se debe acelerar desde una velocidad insignificante (en el tanque) hasta una velocidad considerable (en la tubería), tal como se muestra en la figura 3 (Espinoza y Pezo, 2023, p. 12).

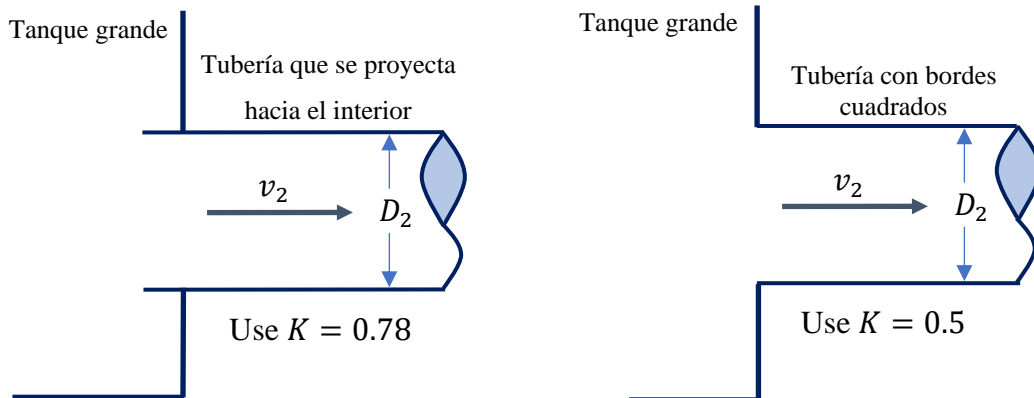


Figura 3. Coeficientes de resistencia de entrada.

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

La figura 3, indica el valor de K para dos casos diferentes. En consecuencia, la pérdida de energía correspondiente, se evalúa con la ecuación (12).

- **Coefficiente de resistencia para válvulas y accesorios**

Al comparar las ecuaciones (8) y (12), se puede deducir que K , resulta:

$$K = \left(\frac{L_e}{D}\right) f. \quad (13)$$

Donde la cantidad L_e/D , es la relación de longitud equivalente, la misma que se indica en la tabla 1 y se considera constante para un tipo dado de válvula y accesorio (Espinoza y Pezo, 2023, pp. 13-14; Bravo, 2020, pp. 19-20). La cantidad L_e , se conoce como longitud equivalente y simboliza la longitud de un tubo recto del mismo diámetro nominal que la válvula y que tendría la misma resistencia (Espinoza y Pezo, 2023, pp. 13-14).

Tabla 1. Resistencia de válvulas y accesorios expresadas como longitud equivalente.

Tipo	Relación de longitud equivalente L_e/D
Válvula solenoide totalmente abierta	970
Válvula de ángulo totalmente abierta	150
Válvula de compuerta - totalmente abierta	8
- abierta al 75 %	35
- abierta al 50 %	160
- abierta al 25 %	900
Válvula esférica totalmente abierta	150
Codo estándar de 90°	30
Te estándar – con flujo por la línea principal	20
Te estándar – con flujo por la ramificación	60

Fuente: Espinoza y Pezo, 2023, p. 13; Bravo, 2020, pp. 19-20.

1.2.7. Sistema automatizado

Rodríguez, Cerdá y Bezos (2022, p. 7), mencionan que un sistema automatizado se define como un mecanismo que puede funcionar por sí sólo, el cual está conformado por los siguientes elementos: red eléctrica (cables, llave térmica, transformadores, etc.), controladores lógicos programables o relés programables (representan el cerebro de todo sistema automatizado, debido a que se encargan de ejecutar los algoritmos de control), interfaz de comunicación, generadores de señal (pulsadores, botones, sensores,

interruptores, etc.) y actuadores (electrobombas, compresores, válvulas solenoides, motores eléctricos, ventiladores, etc.).

- **Relé programable**

El relé programable o relé inteligente representa el cerebro del sistema automatizado (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, p. 336). La programación del relé, se realiza en lenguaje ladder y haciendo uso de un software de simulación. Un relé programable, posee en su estructura básica los siguientes componentes: una fuente de alimentación, un CPU (Unidad Central de Procesamiento), una cantidad determinada de entradas y salidas físicas, una pantalla LCD o display y un conector de programación (Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 6; Chong y Ferreyra, 2023, pp. 13-14). Por ejemplo, en la figura 4, se puede observar un relé programable cuya fuente de alimentación trabaja con un rango de voltaje de 100 – 240 VAC, tiene ocho (8) entradas (I1, I2, ..., I8) y cuatro (4) salidas físicas (Q1, Q2, ..., Q4) (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, p. 313). Mediante la pantalla LCD o display, se puede visualizar los mensajes y la programación realizada. El conector de programación es un puerto de comunicación tipo COM, el mismo que permite la conexión física entre el relé programable y una PC (computadora personal) (Chong y Ferreyra, 2023, pp. 13-14).

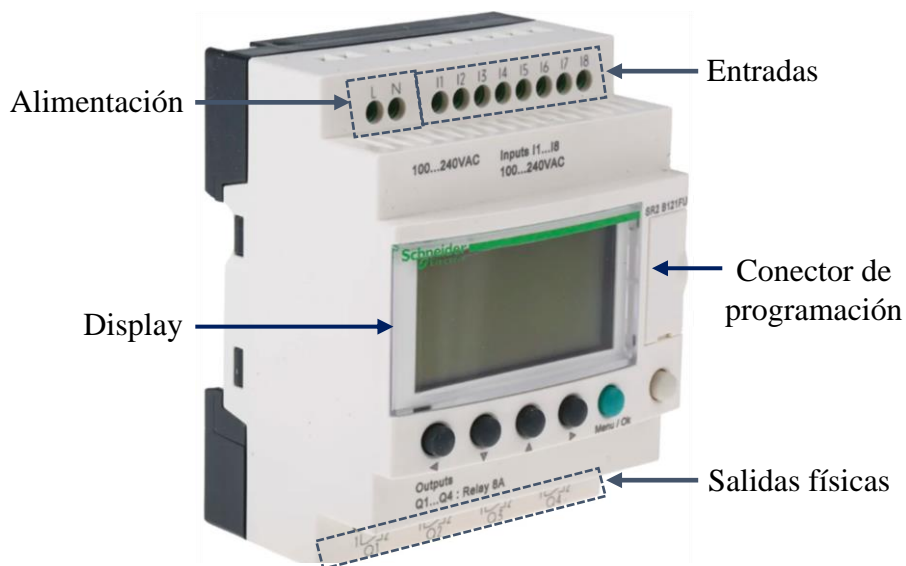


Figura 4. Relé programable con ocho entradas y cuatro salidas físicas.

Fuente: Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, p. 345.

- **Diagrama ladder o lógica de contactos**

Chong y Ferreyra (2023, p. 12), mencionan que la programación de un autómata o relé inteligente se realiza mediante el diagrama ladder, el cual es un lenguaje de programación gráfico que consiste en hacer un diagrama muy parecido a un circuito eléctrico de lógica cableada. Una ecuación o un sistema de ecuaciones lógicas, también puede ser representando mediante un diagrama ladder; por ejemplo, si se tiene el siguiente sistema formado por las ecuaciones (14) y (15), se puede representar mediante el diagrama que se muestra en la figura 5.

$$i1 * (I2 + M1) = M1. \quad (14)$$

$$M1 = Q1. \quad (15)$$

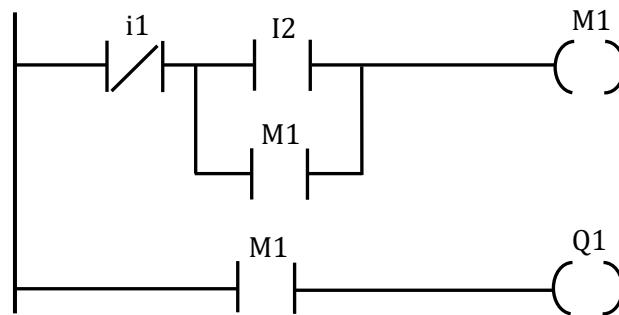


Figura 5. Sistema de ecuaciones lógicas representado mediante un diagrama ladder.

Fuente: *Elaboración propia.*

- **Entradas de un relé programable**

Como puede observarse en la figura 4, las entradas de un relé programable se encuentran situadas en la parte superior. Dichas entradas se simbolizan por la letra I en el software de programación del relé y representan a contactos normalmente abiertos (NA) o normalmente cerrados (NC). Además, se debe entender que las entradas de un relé programable, se deben conectar a los generadores de señal, los cuales pueden ser: pulsadores, interruptores, sensores, botones, etc. (Chong y Ferreyra, 2023, p. 14).

- **Salidas físicas de un relé programable**

También en la figura 4, se puede observar que las salidas físicas de un relé

programable, se encuentran ubicadas en la parte inferior, las cuales se simbolizan por la letra Q y en el software de programación representan a bobinas. Dichas salidas deben ser conectadas a los actuadores, los cuales pueden ser: electrobombas, compresores, válvulas solenoides, motores eléctricos, ventiladores, etc. (Chong y Ferreyra, 2023, p. 14).

- **Interfaz de comunicación**

La interfaz de comunicación, se utiliza para realizar la transferencia de datos desde una PC al relé programable, la misma que consta de un cable que une a dos puertos de comunicación: COM y USB, los cuales se deben conectar al relé programable y a la PC, tal como se indica en la figura 6 (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2014, p. 358; citado por Chong y Ferreyra, 2023, p. 26).



Figura 6. Interfaz de comunicación entre una PC y el relé programable.

Fuente: Modificado de Chong y Ferreyra, 2023, p. 26.

- **Válvula solenoide**

Una válvula solenoide, se define como un dispositivo o actuador cuya finalidad es controlar el flujo de líquidos o gases en un conducto; la misma que es activada eléctricamente por medio de interruptores eléctricos, termostatos, temporizadores, o cualquier otro dispositivo que abra o cierre un circuito eléctrico, utilizando para esto una bobina solenoide (Saravia, 2019, pp. 22-23).

La válvula solenoide es un dispositivo o actuador que funciona con corriente eléctrica, manteniéndose en posición totalmente abierta o totalmente cerrada. En la figura 7, se observa las partes principales de una válvula solenoide común, estando la aguja

conectada mecánicamente hacia la parte inferior del émbolo. Cuando se activa la bobina por medio de la corriente eléctrica, el émbolo se mueve hasta llegar al centro de la bobina, haciendo de esta forma que el fluido fluya desde la entrada hasta la salida de la válvula. La desactivación de la bobina, hace que el émbolo caiga por gravedad, regresando de este modo a su posición inicial, en la cual dicha válvula permanece completamente cerrada (Muñoz y Torres, 2017, pp. 6-7).

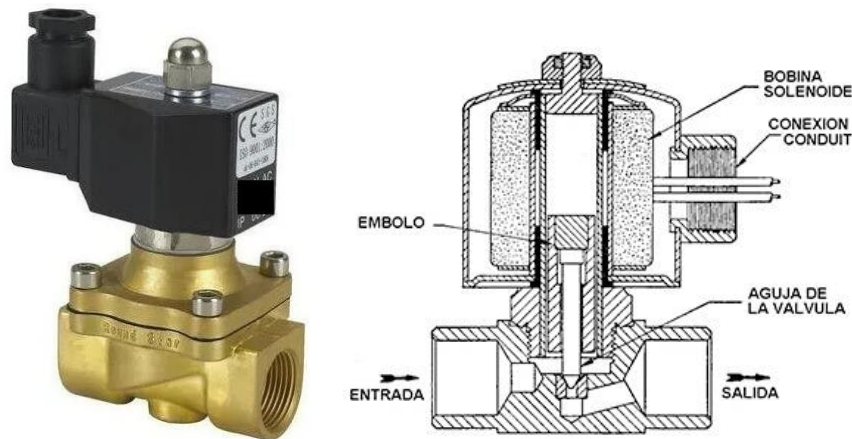


Figura 7. Válvula solenoide.

Fuente: Saravia, 2019, p. 23; Muñoz y Torres, 2017, p. 6.

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1. Contacto normalmente abierto (NA)

Es aquel contacto que, en su estado normal, no admite el paso de energía eléctrica y se representa en el software de programación del relé, tal como se muestra en la figura 8 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 28).

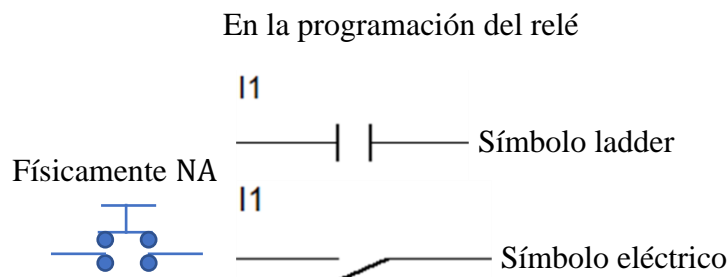


Figura 8. Representaciones de un contacto NA en el software de programación del relé.

Fuente: Chong y Ferreyra, 2023, p. 28.

1.3.2. Contacto normalmente cerrado (NC)

Este contacto en su estado normal, si admite el paso de energía eléctrica y se representa en el software de programación del relé, tal como se muestra en la figura 9 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 28).

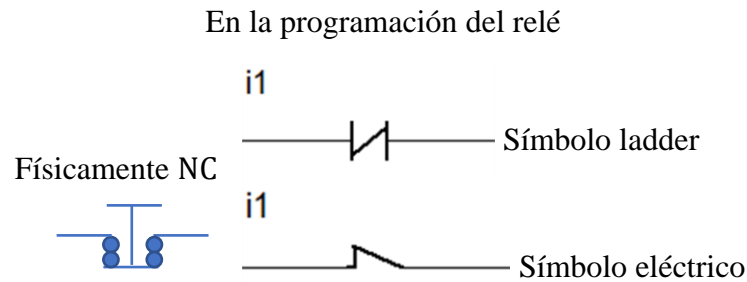


Figura 9. Representaciones de un contacto NC en el software de programación del relé.

Fuente: Chong y Ferreyra, 2023, p. 28.

1.3.3. Enclavamiento o retención

Es la operación que se realiza con la finalidad de prender o activar a una bobina del relé programable, la cual permanecerá en este estado hasta que se desee apagarla o desactivarla (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 15). Para prender a dicha bobina, se puede generar una señal presionando un pulsador NA(start) y en cualquier momento que se necesite apagarla, será suficiente presionar un pulsador NC(stop) (Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 15). Por ejemplo, para el enclavamiento o retención de la marca M1, se tiene la siguiente ecuación lógica:

$$I1 \times I2 + M1 = M1. \quad (16)$$

Entonces, la representación mediante un diagrama ladder de la ecuación (16) se muestra en la figura 10.

Las figuras 10 y 11, muestran que para prender la marca M1 se debe presionar el pulsador de inicio I2(NA), de esta forma el contacto respectivo de M1 queda cerrado. En cualquier momento que se desee apagar a M1, será suficiente presionar el pulsador de paro o stop I1(NC), impidiendo de esta manera que la carga eléctrica fluya hacia la mencionada marca.

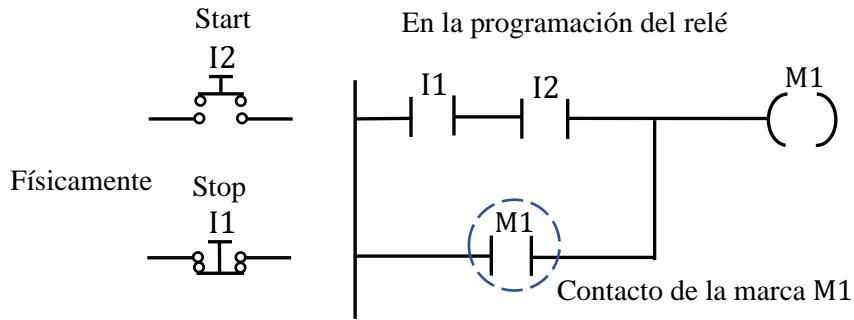


Figura 10. Diagrama ladder de un enclavamiento o retención.

Fuente: Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 15.

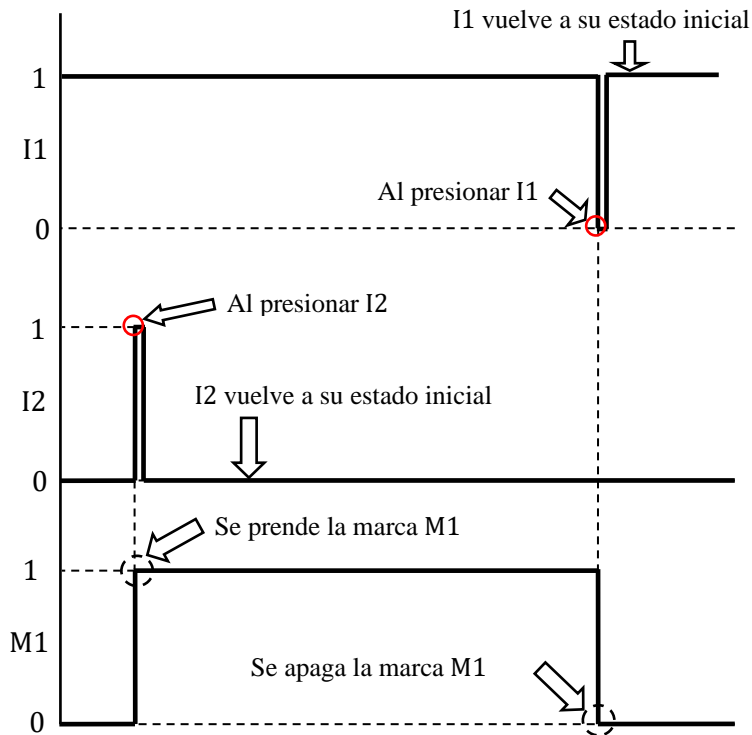


Figura 11. Diagrama de estado para los elementos de un enclavamiento o retención.

Fuente: Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 15.

1.3.4. Temporizadores

Chong y Ferreyra (2023, p. 21), mencionan que los temporizadores son dispositivos internos de un relé programable, los cuales realizan el trabajo de contar el tiempo y que pueden utilizarse en el control automático del tiempo de funcionamiento de motores eléctricos. En el software de programación del relé, el temporizador se representa

con la letra T seguido del número correspondiente, el mismo que está conformado por dos partes: la bobina y los contactos (pueden ser NA y NC) (Chong y Ferreyra, 2023, p. 21).

1.3.5. Variables de control automático

Son aquellas variables, que representan al estado de las entradas y de la salida física que se utilizan en el relé programable, las mismas que se mencionan en detalle a continuación:

- **Estado de las entradas del relé programable que se conectan a los pulsadores I1 e I2.** Se refieren a los valores lógicos (0 o 1) que indican el estado (abierto o cerrado) de las entradas 1 y 2 del relé programable, respectivamente (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2014, p. 350; citado por Chong y Ferreyra, 2023, pp. 32-33).
- **Estado de la marca de enclavamiento M1.** Se refiere al valor lógico (0 o 1) que indica el estado o la situación (prendido o apagado) de la bobina interna del relé programable, la cual tiene la función de energizar a la salida física Q1 y al temporizador TT1 (Del Águila y Haquiwara, 2022, pp. 15-17; Chong y Ferreyra, 2023, p. 31).
- **Estado del temporizador TT1.** Se refiere al valor lógico (0 o 1) que indica el estado o la situación (prendido o apagado) del temporizador TT1, el cual tiene la función de contar el tiempo que estará prendida la salida física Q1 del relé programable (Del Águila y Haquiwara, 2022, pp. 15-17; Chong y Ferreyra, 2023, p. 34).
- **Estado de la salida física Q1.** Es el valor lógico (0 o 1) que indica la situación o estado (apagado o prendido) de la salida física del relé programable que se conecta a la válvula solenoide (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33).

1.3.6. Variables de la operación de drenaje

Se refieren concretamente a las que están involucradas en dicha operación, las cuales se mencionan a continuación:

- **Nivel inicial de líquido.** Representa a la altura inicial de líquido en el tanque cónico, se denota como H_i y su valor se determina realizando una inspección al visor que está instalado en dicho tanque (Flores, López y Menéndez 2012, p. 24).
- **Altura y radio del tanque cónico.** Se simbolizan como H_{TC} y R_{TC} , respectivamente (Flores, López y Menéndez 2012, p. 24), para los cuales se considera la siguiente relación:

$$H_{TC} = 3R_{TC}. \quad (17)$$

El volumen de un tanque cónico (V_{TC}), se define por la siguiente ecuación:

$$V_{TC} = \frac{\pi}{3} R_{TC}^2 H_{TC}. \quad (18)$$

Considerando la ecuación (17), V_{TC} queda en términos de H_{TC} , tal como se indica en la ecuación (19):

$$V_{TC} = \frac{\pi}{27} H_{TC}^3. \quad (19)$$

- **Volumen inicial de líquido.** Es el volumen que corresponde al nivel inicial de líquido, se simboliza como V_i (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25) y para este caso su valor se puede determinar aplicando la siguiente ecuación:

$$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3. \quad (20)$$

- **Volumen de drenaje.** Es la cantidad de volumen de líquido que se desea drenar del tanque cónico, el valor teórico y experimental se simbolizan como $V_{D(Teo)}$ y $V_{D(Exp)}$, respectivamente (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).
- **Nivel final de líquido.** Representa a la altura de líquido en el tanque cónico al final de la operación de drenaje, el valor teórico y experimental se simbolizan

como $H_{f(\text{Teo})}$ y $H_{f(\text{Exp})}$, respectivamente, los cuales se pueden determinar aplicando la ecuación (21) y realizando una inspección al visor que está instalado en dicho tanque (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).

$$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}}. \quad (21)$$

- **Volumen final de líquido.** Es el volumen que corresponde al nivel final de líquido, se simboliza como V_f (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25) y para este caso el valor teórico y experimental se pueden determinar aplicando las siguientes ecuaciones:

$$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})}. \quad (22)$$

$$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3. \quad (23)$$

Téngase en cuenta que $V_{f(\text{Teo})}$, también se puede expresar en términos de $H_{f(\text{Teo})}$, es decir:

$$V_{f(\text{Teo})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Teo})}^3. \quad (24)$$

Entonces, al relacionar las ecuaciones (20), (22) y (24), se obtiene:

$$\frac{\pi}{27} H_{f(\text{Teo})}^3 = \frac{\pi}{27} H_i^3 - V_{D(\text{Teo})}. \quad (25)$$

De esta forma al despejar $H_{f(\text{Teo})}$ de la ecuación (25), se obtiene la ecuación (21).

- **Tiempo programado en el sistema automatizado.** Es el tiempo que se requiere teóricamente, para drenar una determinada cantidad de líquido del tanque cónico, se denota como t_p y está en relación con los niveles inicial y final de líquido (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

El sistema automatizado a implementarse para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, debe estar conformado por los siguientes componentes: un relé programable, una interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar.

b. Hipótesis específicas

- Existe relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico.
- Existe relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico.
- Los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, deben ser: dos entradas y una salida física del relé programable, una marca de enclavamiento y un temporizador.
- Existe el sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionan el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador.

2.2. Variables y su operacionalización

• En el control automático

Variables independientes: estado de las entradas del relé programable que se conectan a los pulsadores I1(NC) e I2(NA).

Variables intervinientes: estado de la marca de enclavamiento y estado del temporizador.

Variable dependiente: estado de la salida física del relé programable que se

conecta a la válvula solenoide.

- **En la operación de drenaje**

Variables independientes: nivel inicial de líquido y volumen de líquido que se desea drenar.

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

Variable dependiente: tiempo programado en el sistema automatizado.

Tabla 2. Operacionalización de las variables en el control automático.

VARIABLES	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Estado de las entradas del relé programable que se conectan a los pulsadores I1(NC) e I2 (NA).	I1 I2	Son los valores lógicos que definen la situación de las entradas 1 y 2 del relé programable, respectivamente (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, p. 350).	Cuantitativa discreta	Abierto: 0 Cerrado: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2019.
Intervinientes						
Estado de la marca de enclavamiento.	M1	Se refiere al valor lógico que indica la situación de la marca de enclavamiento M1 (Del Águila y Haquiwara, 2022, pp. 15-17; Chong y Ferreyra, 2023, p. 31).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Prendido: 1	Razón	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo de la programación del diagrama ladder, mediante Zelio Soft 2 V5.4.2. • Archivo en Microsoft Excel 2019.
Estado del temporizador.	TT1	Se refiere al valor lógico que indica el estado del temporizador TT1 (Del Águila y Haquiwara, 2022, pp. 15-17; Chong y Ferreyra, 2023, p. 34).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Prendido: 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 2019.
Dependiente						
Estado de la salida física Q1.	Q1	Es el valor lógico que indica la situación o estado de la salida física del relé programable que se conecta a la válvula solenoide (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33).	Cuantitativa discreta	Apagado: 0 Prendido: 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 2019.

Fuente: Elaboración propia.

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

Variables	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Nivel inicial de líquido	H_i	Representa a la altura inicial de líquido en el tanque cónico (Flores, López y Menéndez 2012, p. 24).	Cuantitativa continua	cm m	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.
Volumen de drenaje	V_D	Es la cantidad de volumen de líquido que se desea drenar del tanque cónico (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.
Intervinientes						
Volumen inicial de líquido	V_i	Es el volumen que corresponde al nivel inicial de líquido (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.
Nivel final de líquido	H_f	Representa a la altura de líquido en el tanque cónico al final de la operación de drenaje (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).	Cuantitativa continua	cm m	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.
Volumen final de líquido	V_f	Es el volumen que corresponde al nivel final de líquido (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25)	Cuantitativa continua	m ³ L	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.
Dependiente						
Tiempo programado en el sistema automatizado	t_p	Es el tiempo que se requiere teóricamente, para drenar una determinada cantidad de líquido del tanque cónico (Flores, López y Menéndez 2012, p. 25).	Cuantitativa continua	s	Razón	Archivo en Microsoft Excel 2019.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En la presente investigación, primeramente, se dedujo un modelo matemático mediante el cual se puede determinar el tiempo para drenar una cierta cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos, realizándose para esto un esquema ideal y aplicándose la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía. A continuación, se determinó cuáles son los componentes del diagrama ladder, lo cual permitió realizar la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, el mismo que se programó en una PC utilizándose el software Zelio Soft2 V5.4.2 y luego se transfirió de la PC al relé programable mediante la interfaz de comunicación. Seguidamente, se procedió a realizar el montaje del sistema automatizado, el cual estuvo conformado por los siguientes componentes: un relé programable, el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y una llave térmica con su enchufe bipolar. Finalmente, se instaló dicho sistema automatizado en el tanque cónico y se realizaron ocho (8) pruebas de funcionamiento, determinándose en cada caso el tiempo programado en el sistema automatizado y los porcentajes de error del nivel final de líquido, del volumen final de líquido y del volumen de drenaje. Entonces, se puede decir que la presente investigación tiene enfoque cuantitativo y es del tipo aplicada con diseño correlacional. Los esquemas del diseño de investigación para el control automático y para la operación de drenaje, se muestran en las figuras 12 y 13, respectivamente.

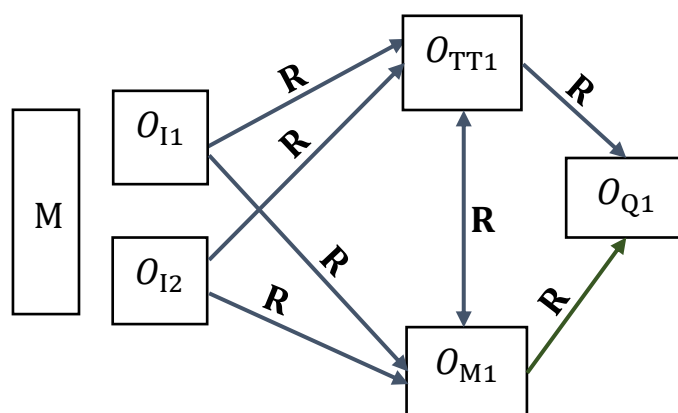


Figura 12. Esquema del diseño de investigación para el control automático.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

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

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

M1 : estado de la marca de enclavamiento (variable interviniente).

TT1 : estado del temporizador (variable interviniente).

Q1 : estado de la salida física del relé programable que se conecta a la válvula solenoide (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

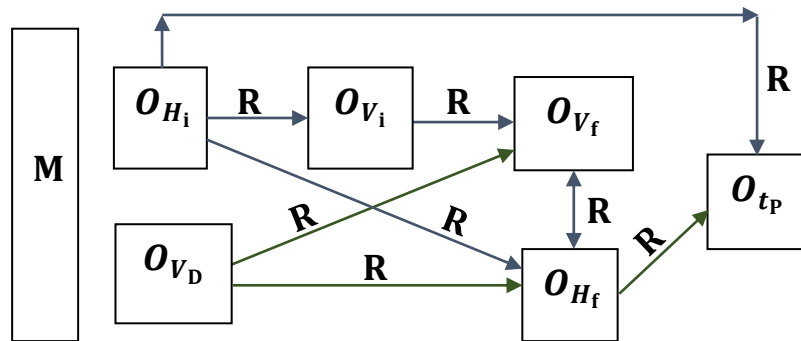


Figura 13. Esquema del diseño de investigación para la operación de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{H_i} , O_{V_D} , O_{V_i} , O_{H_f} , O_{V_f} y O_{t_p} , son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (H_i , V_{DL} , V_i , H_f , V_f y t_p , respectivamente), distintas de la muestra.

H_i : nivel inicial de líquido (variable independiente).

V_D : volumen de drenaje (variable independiente).

V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).

H_f : nivel final de líquido (variable interviniente).

V_f : volumen final de líquido (variable interviniente).

t_p : tiempo programado en el sistema automatizado (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

3.1.1. Esquema para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado

En la figura 14, se puede observar el equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, antes de ser implementado con el sistema automatizado, lo cual indicaba que no se encontraba en las condiciones óptimas para realizar las prácticas de laboratorio en lo que se refiere a los cursos de mecánica de fluidos y automatización de procesos químicos, pues no contaba con la implementación de un sistema automatizado para realizar el drenaje de líquidos de forma automática, lo cual generaba una dificultad en el afianzamiento de las capacidades que recibían en las aulas los estudiantes de la FIQ-UNAP.



Figura 14. Equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, antes de ser implementado con el sistema automatizado.

Fuente: Laboratorio de Operaciones y Procesos de la FIQ-UNAP.

De esta forma, es que, en el presente trabajo de tesis, se ha planteado realizar el mejoramiento de dicho equipo, mediante la implementación de un sistema automatizado,

lo cual se muestra en la figura 15. Entonces, los componentes principales del sistema automatizado son: un relé programable, el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador verde y una llave térmica con su enchufe bipolar. Para drenar una determinada cantidad de volumen de líquido en el tanque cónico, el procedimiento es el siguiente:

- Se debe hacer una inspección al visor para determinar el nivel inicial de líquido (H_i) en el tanque cónico. Este valor se puede escribir en una celda de Microsoft Excel 2019 y determinar automáticamente el volumen correspondiente (V_i).
- Seguidamente se debe escribir en otra celda la cantidad del volumen de líquido que se desea drenar (V_D). Entonces, se debe hacer uso del modelo matemático para determinar el tiempo requerido para drenar el mencionado volumen.
- El relé programable internamente tiene un temporizador, en el cual se puede programar dicho tiempo. Entonces, al presionar el pulsador verde NA, en ese mismo instante el relé programable mandará una señal eléctrica a la válvula solenoide haciendo que esta se prenda, lo cual se indicará con el prendido del piloto verde (figuras 15 y 16), permitiendo de este modo que el líquido que está contenido en el tanque cónico empiece a fluir a través de la línea de descarga durante todo el tiempo programado. Cuando el temporizador termine de contar dicho tiempo, el relé programable mandará otra señal eléctrica a la válvula solenoide haciendo que esta se apague, lo mismo que se indicará con el apagado del piloto verde (figuras 15 y 16). Cabe mencionar que la válvula solenoide, al estar prendida se encuentra totalmente abierta y al ser apagada se encuentra totalmente cerrada. En cualquier momento que se desee u ocurra algún inconveniente, se puede presionar el pulsador rojo NC, apagando a todo el sistema automatizado.

Es preciso indicar que, el orden de conexiones para las entradas y salida física del relé programable, debe ser el siguiente:

El pulsador rojo I1 (físicamente NC) se debe conectar a la entrada 1.

El pulsador verde I2 (físicamente NA) se debe conectar a la entrada 2.

La válvula solenoide y el piloto indicador verde, se deben conectar en forma paralela a la salida física Q1.

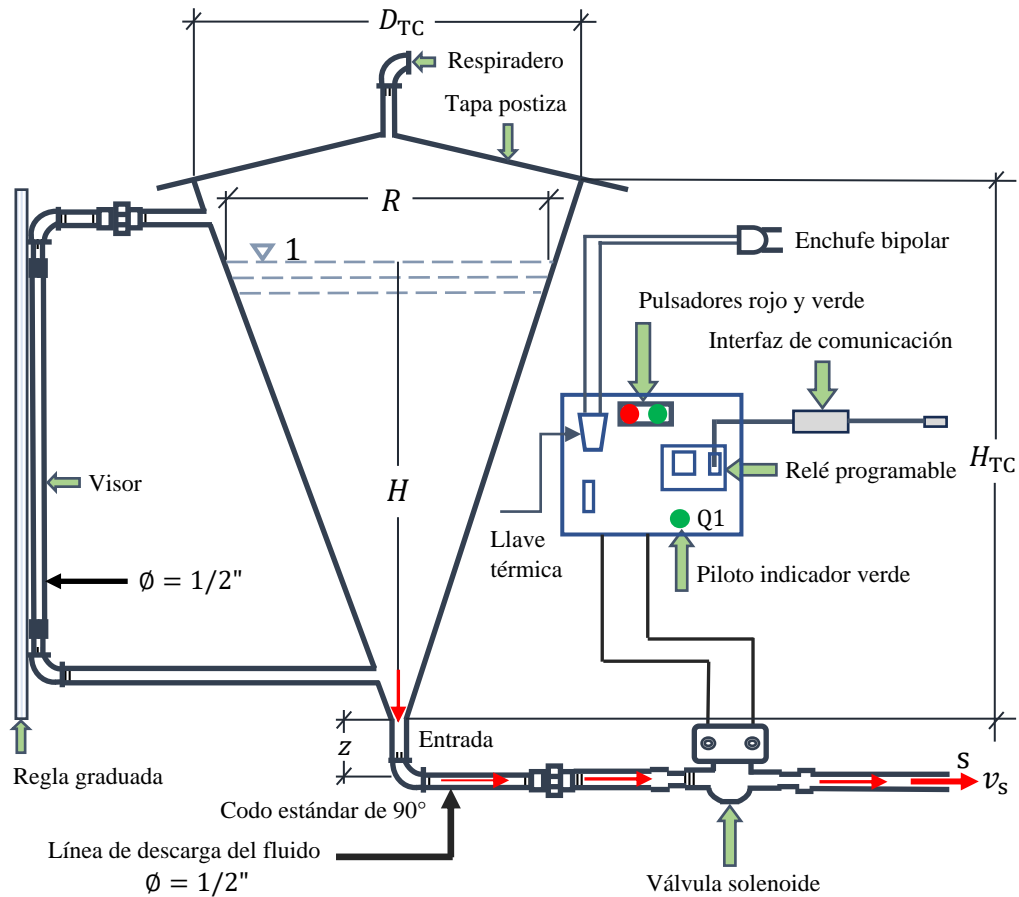


Figura 15. Esquema de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, al ser implementado mediante un sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 16, se puede observar que, para la alimentación del relé programable, se debe conectar en serie los bornes L y N con la llave térmica y el enchufe bipolar.

Para realizar el diseño y simulación del diagrama ladder, se puede hacer uso de una PC en donde se debe tener instalado el software Zelio Soft2 V5.4.2 y luego realizar la transferencia de datos de la PC al relé programable mediante la interfaz de comunicación, para lo cual se debe tener en cuenta que los puertos COM y USB se deben

conectar al relé programable y a la PC, respectivamente (figura 16).

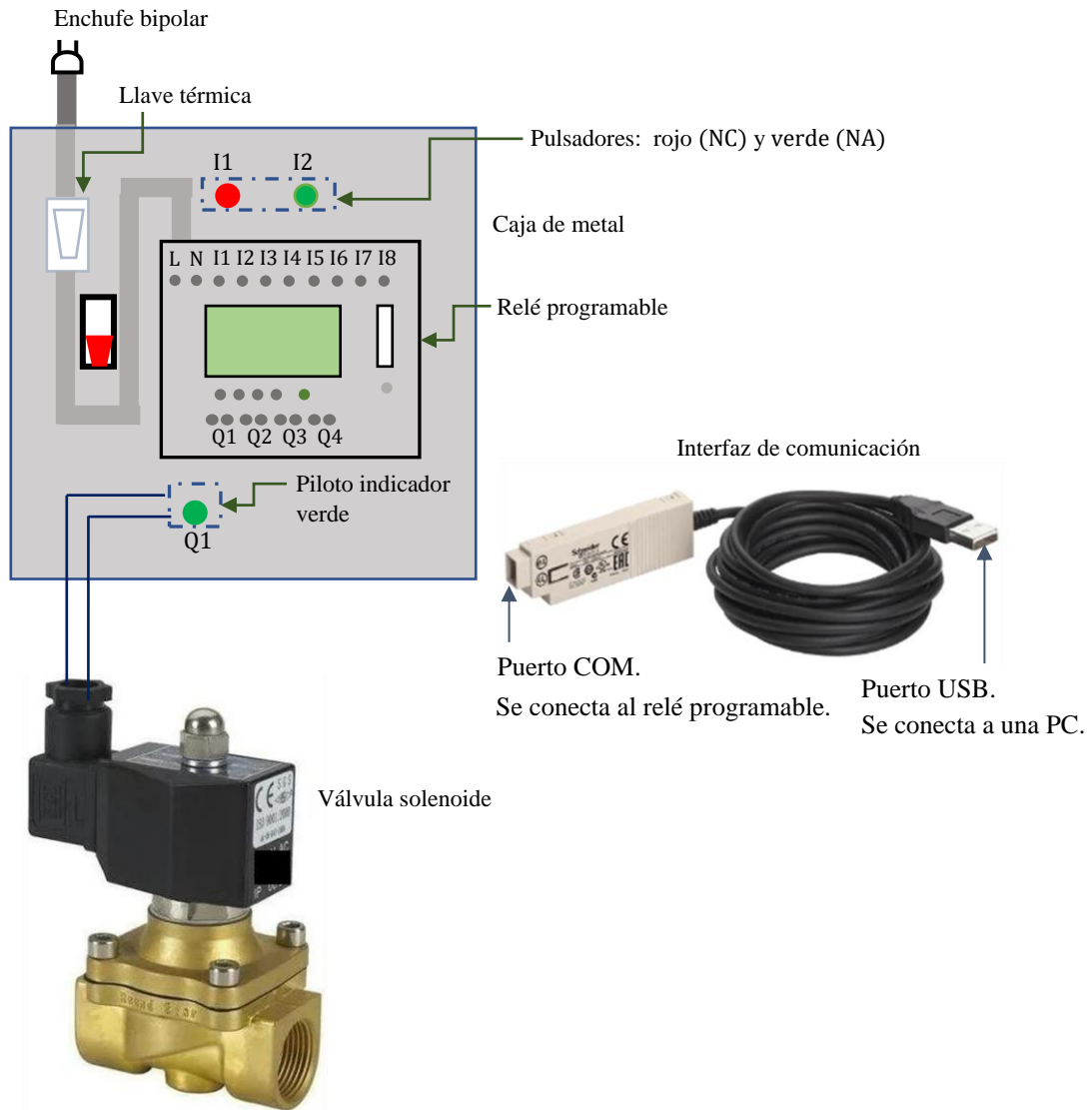


Figura 16. Detalle del sistema automatizado.

Fuente: [Elaboración propia](#).

3.1.2. Dedución del modelo matemático que permite determinar el tiempo para drenar una cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos

Para deducir dicho modelo matemático, se hace la aplicación de la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía entre los puntos 1 y s que se muestran en

la figura 15, esto es:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de entrada} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de salida} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right].$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right] = \frac{dm}{dt}.$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de entrada} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right] = 0.$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de salida} \\ \text{de masa en el equipo} \end{array} \right] = \pi \rho r_s^2 v_s.$$

$$\frac{dm}{dt} = -\pi \rho r_s^2 v_s. \quad (26)$$

Para el caso de un tanque cónico, se tiene:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi}{3} R^2 H \right). \quad (27)$$

Teniendo en cuenta la relación entre radio y altura para el tanque cónico, se tiene:

$$\frac{R}{H} = \frac{R_{TC}}{H_{TC}}. \quad (28)$$

Reemplazando la ecuación (28), en la ecuación (27), se obtiene:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{3} \rho \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{R_{TC}}{H_{TC}} \right)^2 H^3 \right] = \pi \rho \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC}} \right)^2 H^2 \frac{dH}{dt}. \quad (29)$$

Igualando las ecuaciones (26) y (29), se tiene:

$$\pi \rho \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC}} \right)^2 H^2 \frac{dH}{dt} = -\pi \rho r_s^2 v_s. \quad (30)$$

Despejando v_s de la ecuación (30):

$$v_s = - \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 H^2 \frac{dH}{dt}. \quad (31)$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_B - h_R - h_L = \frac{p_s}{\gamma} + z_s + \frac{v_s^2}{2g}. \quad (32)$$

Se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los puntos 1 y s están expuestos a la atmósfera, entonces, se tiene que:

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_s}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma}.$$

- En todo el recorrido que hace el líquido, no hay elementos mecánicos como electrobombas y turbinas, entonces: $h_B = 0$ y $h_R = 0$.
- La altura del punto 1 es: $z_1 = H + z$.
- El nivel de referencia es el punto s, entonces: $z_s = 0$.
- La pérdida de energía total por unidad de peso de fluido (h_L), es igual a la siguiente suma:

$$h_L = K_{Entrada} \frac{v_s^2}{2g} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{Codo} \frac{v_s^2}{2g} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) \frac{v_s^2}{2g} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{VS} \frac{v_s^2}{2g}. \quad (33)$$

Donde:

$$h_1 = K_{Entrada} \frac{v_s^2}{2g} \text{ (a la entrada de la línea de descarga).}$$

$$h_2 = f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{Codo} \frac{v_s^2}{2g} \text{ (codo estándar de } 90^\circ \text{).}$$

$$h_3 = f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) \frac{v_s^2}{2g} \text{ (fricción en la tubería de } 1/2'' \text{).}$$

$$h_4 = f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{VS} \frac{v_s^2}{2g} \text{ (válvula solenoide).}$$

$L_{1/2''}$ = longitud de la tubería de 1/2" de diámetro, m.

$D_{1/2''}$ = diámetro interno de la tubería de 1/2", m.

$f_{m(1/2'')}$ = factor de fricción promedio en la tubería de 1/2" de diámetro, adimensional.

v_s = velocidad lineal promedio del fluido en el punto s, m/s.

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

Las cantidades K_{Entrada} , $(L_e/D)_{\text{Codo}}$ y $(L_e/D)_{VS}$, representan al coeficiente de resistencia a la entrada de la línea de descarga, la relación de longitud equivalente para el codo estándar de 90° y la relación de longitud equivalente para la válvula solenoide, respectivamente.

Al factorizar la carga de velocidad en la ecuación (33), se obtiene:

$$h_L = \left[K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{VS} \right] \frac{v_s^2}{2g}. \quad (34)$$

Sustituyendo toda la expresión que está dentro del corchete de la ecuación (34), por la cantidad β . Entonces, de esta forma h_L queda en términos de la carga de velocidad y β , es decir:

$$h_L = \beta \frac{v_s^2}{2g}. \quad (35)$$

Entonces, teniéndose en cuenta todas las consideraciones mencionadas y la ecuación (35), la ecuación (32) queda:

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

$$\frac{v_1^2}{2g} + H + z = (\beta + 1) \frac{v_s^2}{2g}. \quad (36)$$

Aplicando la ecuación de continuidad entre los puntos 1 y s de la figura 15, se tiene:

$$v_1 = \left(\frac{r_s}{R}\right)^2 v_s. \quad (37)$$

Reemplazando las ecuaciones (37) y (28) en la ecuación (36) y luego despejando v_s :

$$\frac{\left(\frac{r_s}{R}\right)^4 v_s^2}{2g} + H + z = (\beta + 1) \frac{v_s^2}{2g}$$

$$\left[\beta + 1 - \left(\frac{r_s}{R}\right)^4\right] \frac{v_s^2}{2g} = H + z$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[\beta + 1 - \left(\frac{r_s}{R}\right)^4\right]}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[\beta + 1 - \left(\frac{r_s H_{TC}}{R_{TC} H}\right)^4\right]}}. \quad (38)$$

Ahora, al igualar las ecuaciones (31) y (38), se obtiene:

$$-\left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2 H^2 \frac{dH}{dt} = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[\beta + 1 - \left(\frac{r_s H_{TC}}{R_{TC} H}\right)^4\right]}} = \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[\beta + 1 - \left(\frac{r_s H_{TC}}{R_{TC}}\right)^4 \frac{1}{H^4}\right]}}$$

$$\frac{dH}{dt} = -\sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[(\beta + 1) \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^4 H^4 - 1\right]}} \cong \sqrt{\frac{2g(H + z)}{\left[(\beta + 1) \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^4 H^4\right]}}$$

$$\int_0^{t_p} dt = -\sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2 \int_{H_i}^{H_{f(Reo)}} \frac{H^2}{\sqrt{H + z}} dH. \quad (39)$$

Haciendo el cambio de variable: $Y = H + z$, entonces: $dY = dH$.

$$Y_i = H_i + z, \quad Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z.$$

Resolviendo por separado la integral del lado derecho de la ecuación (39), se tiene:

$$\int \frac{H^2}{\sqrt{H+z}} dH = \int \frac{(Y-z)^2}{\sqrt{Y}} dY = \int \frac{Y^2 - 2zY + z^2}{\sqrt{Y}} dY$$

$$\int \frac{H^2}{\sqrt{H+z}} dH = \int (Y^{3/2} - 2zY^{1/2} + z^2Y^{-1/2}) dY = \int Y^{3/2} dY - 2z \int Y^{1/2} dY + z^2 \int Y^{-1/2} dY$$

$$\int \frac{H^2}{\sqrt{H+z}} dH = \frac{2}{5} Y^{5/2} - \frac{4}{3} z Y^{3/2} + 2z^2 Y^{1/2}.$$

Entonces, dicha integral queda en términos de Y , es decir:

$$\int_{H_i}^{H_{f(\text{Teo})}} \frac{H^2}{\sqrt{H+z}} dH = \int_{Y_i}^{Y_{f(\text{Teo})}} \frac{(Y-z)^2}{\sqrt{Y}} dY. \quad (40)$$

De esta forma, el resultado de las integrales de la ecuación (40), es:

$$\int_{Y_i}^{Y_{f(\text{Teo})}} \frac{(Y-z)^2}{\sqrt{Y}} dY = \frac{2}{5} (Y_{f(\text{Teo})}^{5/2} - Y_i^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_{f(\text{Teo})}^{3/2} - Y_i^{3/2}) + 2z^2 (Y_{f(\text{Teo})}^{1/2} - Y_i^{1/2}). \quad (41)$$

Al reemplazar la ecuación (41), en la ecuación (39), se obtiene:

$$t_P = -\sqrt{\frac{(\beta+1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_{f(\text{Teo})}^{5/2} - Y_i^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_{f(\text{Teo})}^{3/2} - Y_i^{3/2}) + 2z^2 (Y_{f(\text{Teo})}^{1/2} - Y_i^{1/2}) \right]$$

$$t_P = \sqrt{\frac{(\beta+1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right]. \quad (42)$$

La ecuación (42), representa al modelo matemático que permite determinar el tiempo para drenar una cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos; donde las cantidades β , g , R_{TC} , H_{TC} y r_s , representan a los parámetros; las cantidades $Y_i = H_i + z$ e $Y_{f(Te0)} = H_{f(Te0)} + z$, son las variables independientes y t_p es la variable dependiente. Por lo tanto, se puede decir que, existe relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado (t_p) con los niveles inicial (H_i) y final de líquido ($H_{f(Te0)}$) en un tanque cónico.

3.1.3. Diseño del diagrama ladder para la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos

El diagrama ladder para la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónico, está conformado por los siguientes procedimientos que se mencionan a continuación:

- **Enclavamiento o retención de la marca M1.** Este procedimiento consiste en activar o prender a la marca M1, para eso se debe presionar el pulsador verde I2 (NA), de esta forma la carga eléctrica fluirá hacia la marca M1 (figuras 16 y 17).
- **Prendido del temporizador TT1 y de la salida física Q1 del relé programable.** En el mismo instante que se activa a la marca M1, su contacto respectivo queda cerrado haciendo que la carga eléctrica fluya hacia el temporizador TT1 y hacia la física Q1. Como la válvula solenoide debe estar conectada a la salida física Q1; entonces, al ser prendido el temporizador TT1, se debe iniciar el conteo del tiempo que debe estar prendida la válvula solenoide (figuras 17 y 18). Este tiempo se programa en el sistema automatizado, para eso se debe escribir su valor en la ventana de parámetros del temporizador TT1 (figura 19).
- **Desactivación del temporizador TT1 y apagado de la salida física Q1 del relé programable.** Cuando el temporizador TT1 termine de contar dicho tiempo, el contacto cerrado t1 se abrirá quitando el flujo de carga eléctrica a la marca M1, lo cual hará que en ese mismo instante se desactive el temporizador TT1 y se apague la salida física Q1 (figuras 17 y 18).

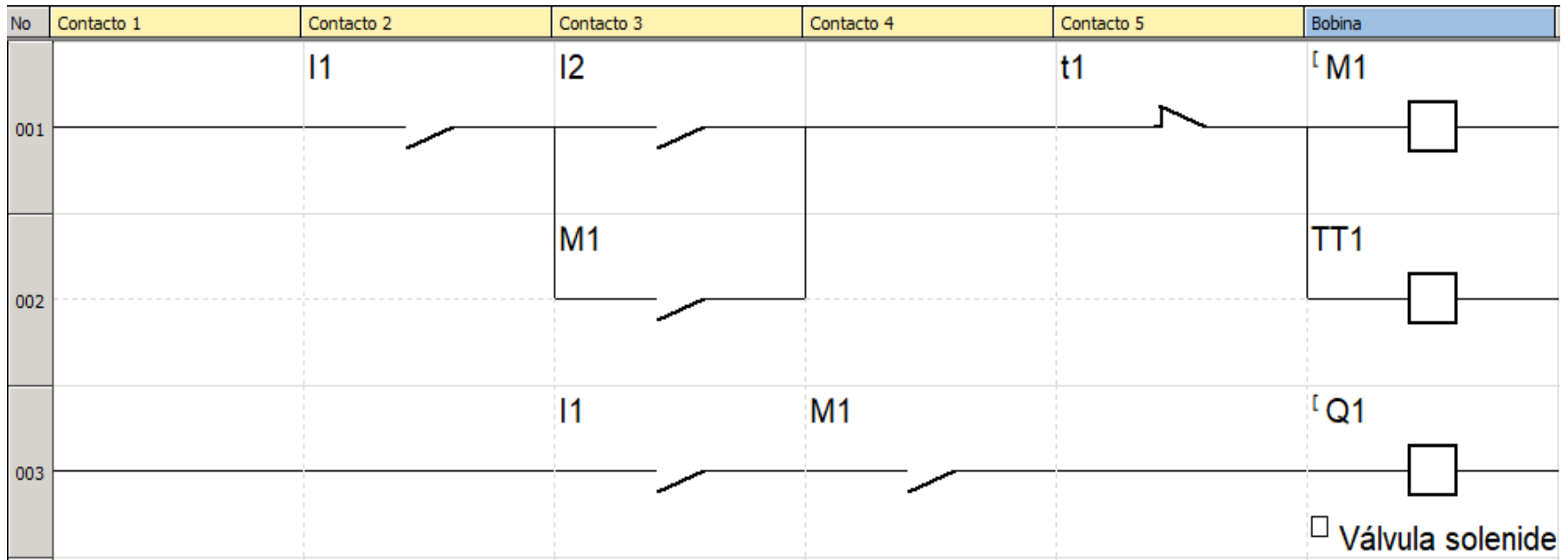


Figura 17. Diseño del diagrama ladder.

Fuente: Elaboración propia.

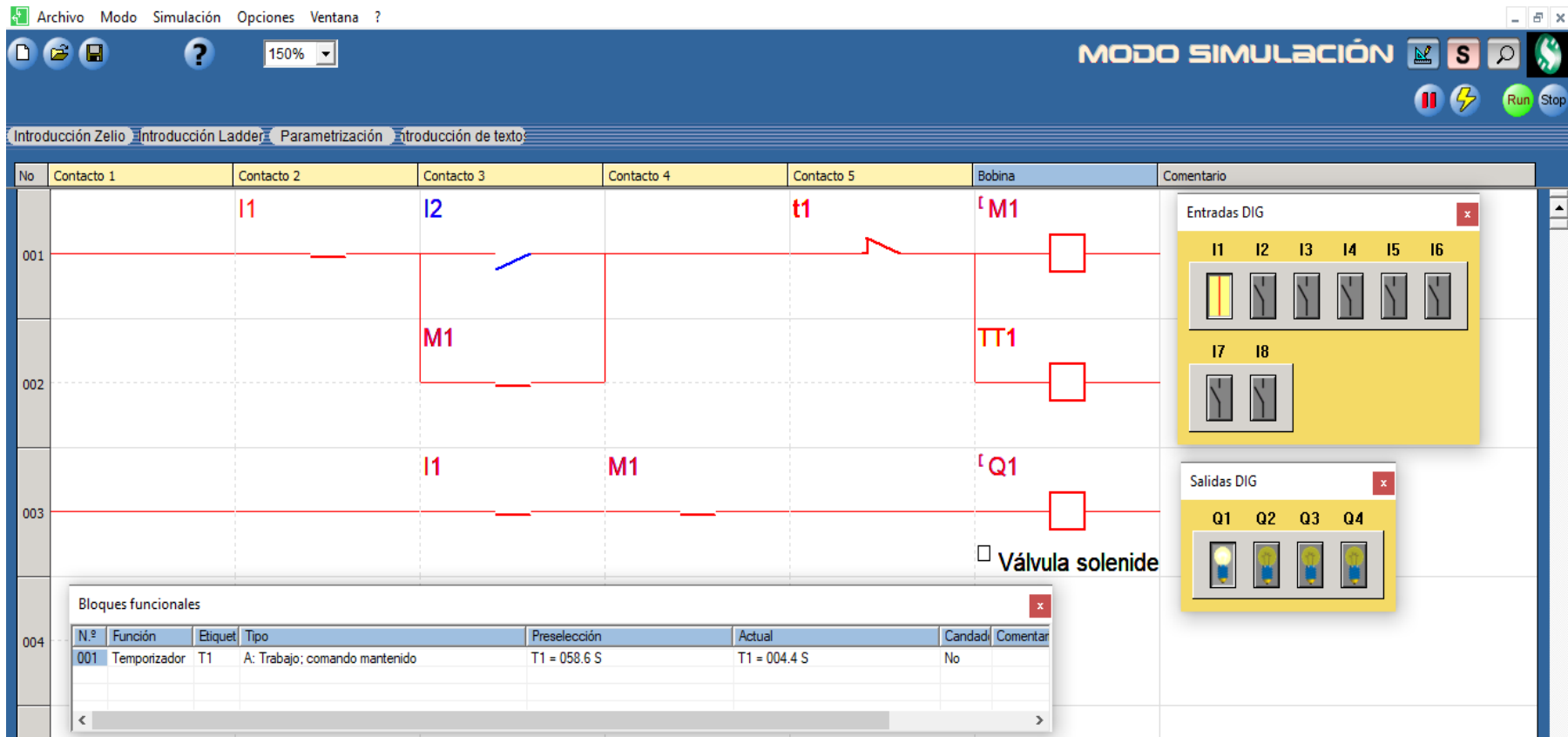


Figura 18. Simulación del diagrama ladder.

Fuente: Elaboración propia.

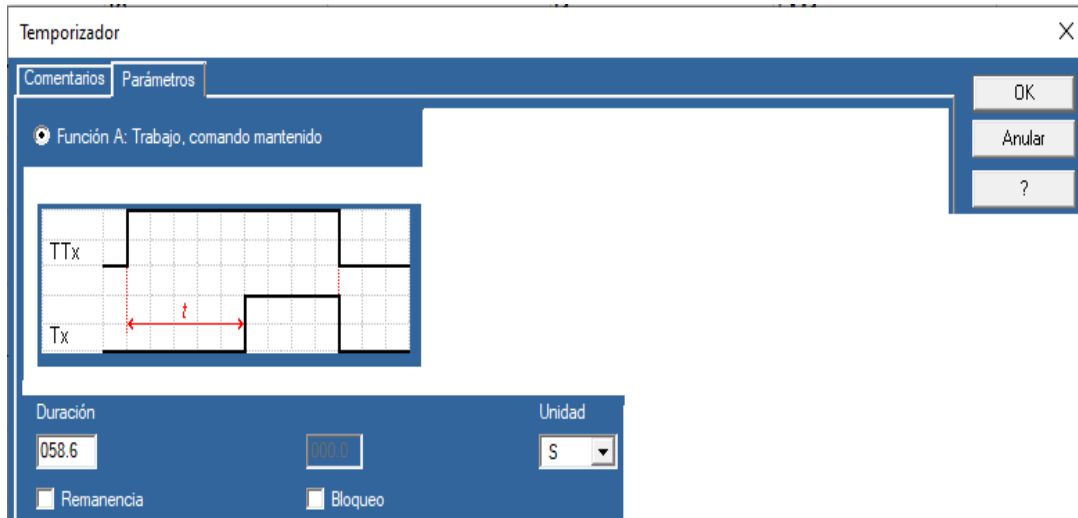


Figura 19. Ventana de parámetros del temporizador.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Determinación de los componentes principales del diagrama ladder

De acuerdo a lo que se puede observar en las figuras 17 y 18, los componentes principales del diagrama ladder son:

- El pulsador I1 (físicamente NC) que se conecta a la entrada 1 del relé programable.
- El pulsador I2 (físicamente NA) que se conecta a la entrada 2 del relé programable.
- La marca de enclavamiento M1, la misma que al energizarse debe prender en el mismo instante al temporizador TT1 y a la salida física Q1.
- El temporizador TT1, el cual al prenderse realiza el conteo del tiempo que debe estar prendida la salida física Q1.
- La salida física Q1 que se conecta al piloto indicador verde y a la válvula solenoide.

3.1.5. Obtención del sistema de ecuaciones, que relaciona el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = M1. \quad (43)$$

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = TT1. \quad (44)$$

$$I1 * M1 = Q1. \quad (45)$$

La ecuación (43), muestra la relación entre el estado de las entradas I1 e I2, el estado del contacto t1 (NC) y el estado de la marca M1. Entonces, para que M1 sea prendida y su contacto respectivo se quede cerrado, necesariamente se debe mantener a los contactos I1 y t1 como normalmente cerrados y se tiene que haber presionado el pulsador I2 (físicamente NA).

La ecuación (44), muestra la relación entre el estado de las entradas I1 e I2, el estado del contacto t1 (NC), el estado de la marca M1 y el estado de la bobina del temporizador TT1. Entonces, para que TT1 se encuentre prendido, necesariamente los contactos I1 y t1 deben estar cerrados y tiene que haber sido prendida la marca M1 al presionarse el pulsador I2 (físicamente NA).

La ecuación (45), muestra la relación entre el estado de la entrada I1, el estado de la marca M1 y el estado de la salida física Q1. De esta forma, para que la salida física Q1 se encuentre prendida, necesariamente los contactos I1 y M1 deben estar cerrados.

Como el estado de la marca M1, será el mismo de su contacto respectivo; entonces, al relacionar las ecuaciones (43) y (45), se obtiene una ecuación que relaciona directamente el estado de las entradas I1 e I2, el estado del contacto t1 (NC), el estado de la marca M1 y el estado de la salida física Q1, es decir:

$$I1 * (I2 + M1) * t1 = Q1. \quad (46)$$

3.1.6. Montaje e instalación del sistema automatizado para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos

En referencia a las figuras 15, 16, 17 y 18, se ha realizado el montaje e instalación del sistema automatizado para el drenaje de líquidos en tanques cónicos. De esta forma, las vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado, se muestran en la figura 20. Para mayor detalle sobre el orden de conexiones para las entradas y la salida física del relé programable, se ha realizado el diagrama de instalación eléctrica, el cual se muestra en la figura 21.



Figura 20. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

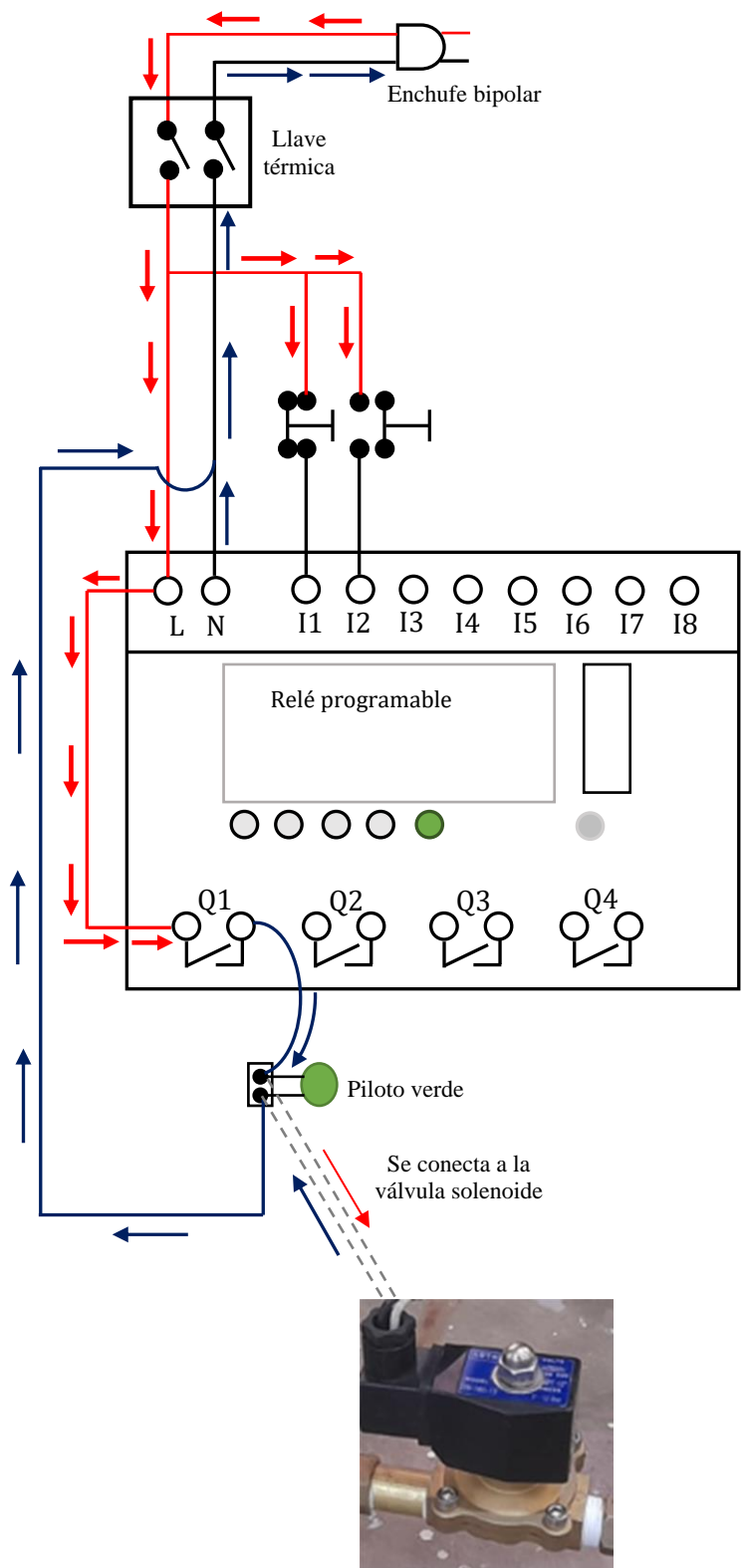


Figura 21. Diagrama de instalación eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

Entonces, de esta manera se muestra en la figura 22, la vista real del equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, después de ser implementado mediante un sistema automatizado.



Figura 22. Vista real del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, después de ser implementado mediante el sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño muestral

En el control automático, la población estuvo conformada por la cantidad total de componentes del diagrama ladder, es decir:

$$\text{Población} = \text{CM} + \text{CSF} + \text{CT} + \text{CCts.} \quad (47)$$

Donde:

CM : cantidad de marcas.

CSF : cantidad de salidas físicas.

CT : cantidad de temporizadores.

CCts : cantidad de contactos.

Entonces, de acuerdo a lo mostrado en las secciones 3.1.3, 3.1.4 y 3.1.4, se tiene que:

$$\text{CM} = 1, \text{CSF} = 1, \text{CT} = 1, \text{CCts} = 4 .$$

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

Entonces, de esta forma se ha determinado que el tamaño de la población para el control automático fue igual a 7. El tipo de muestreo fue el no probabilístico a juicio de los investigadores, considerándose los siguientes criterios:

Criterio de inclusión: se consideró únicamente como muestra, a la salida física Q1 del relé programable, debido a que esta salida se debe conectar a la válvula solenoide, la cual debe permanecer prendida el mismo tiempo que se programa en el sistema automatizado.

Criterio de exclusión: no se consideraron como muestra, a los siguientes componentes del diagrama ladder: la marca M1, el temporizador TT1 y los cuatro contactos: I1, I2, M1 y t1. Esto es debido, a que estos componentes no se conectan físicamente a la válvula solenoide; es decir, representan dispositivos internos del relé programable.

En el caso de la operación de drenaje, la población puede representarse por las múltiples pruebas de funcionamiento, esto indica que el tamaño de población puede ser una cantidad bastante grande. Entonces, de esta manera a juicio de los investigadores, se ha determinado que el tamaño de muestra es igual a las ocho (8) pruebas de funcionamiento que se realizaron en el equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

Para la recolección de datos, se realizaron los siguientes procedimientos que se indican a continuación:

- **Determinación de las dimensiones del tanque cónico y de la tubería de descarga**

Para este caso los parámetros físicos que se determinaron fueron: el radio (R_{TC}) y la altura del tanque cónico (H_{TC}), longitud ($L_{1/2''}$), diámetro interior ($D_{1/2''}$) y radio interior de la línea de descarga ($r_s = D_{1/2''}/2$), de los cuales se muestran sus respectivos valores en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones del tanque cónico y de la tubería de descarga.

R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s
m	m	m	m	m
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar este procedimiento, se utilizó como instrumentos un vernier y una wincha flexómetro.

- **Determinación del factor de fricción promedio**

Para determinar el factor de fricción promedio en toda la línea de descarga, primeramente, se tuvo que evaluar la velocidad lineal promedio en la línea de descarga (v_s)

y el número de Reynolds ($N_{R(1/2")}$) correspondiente, haciéndose uso de las ecuaciones (48) y (49), respectivamente, considerándose los datos que se muestran en la tabla 5 y el siguiente intervalo para el nivel de líquido en el tanque cónico: $0 \leq H \leq 0.836$ m.

$$v_s = \sqrt{2g(H + z)}. \quad (48)$$

$$N_{R(1/2")} = \frac{v_s D_{1/2" } \rho}{\mu}. \quad (49)$$

Entonces, el factor de fricción correspondiente para cada valor de H , se evaluó haciendo uso de la ecuación (50).

$$f_{1/2" } = \frac{0.3164}{N_{R(1/2")}^{0.25}}. \quad (50)$$

Tabla 5. Datos necesarios para determinar el factor de fricción promedio.

g	z	ρ	μ	$D_{1/2" }$
m/s ²	m	kg/m ³	Pa.s	m
9.81	0.115	996	0.0008	0.0165

Fuente: Elaboración propia; Espinoza y Pezo, 2023, p. 26.

Por ejemplo, para evaluar los valores de v_s , $N_{R(1/2")}$ y f , correspondientes para $H = 0.6$ m, el cálculo fue el siguiente:

$$v_s = \sqrt{2g(H + z)} = \sqrt{2 \times 9.81 \times (0.6 + 0.115)} = 3.7454 \text{ m/s.}$$

$$N_{R(1/2")} = \frac{v_s D_{1/2" } \rho}{\mu} = \frac{3.7454 \times 0.0165 \times 996}{0.0008} = 7.69 \times 10^4.$$

$$f_{1/2" } = \frac{0.3164}{N_{R(1/2")}^{0.25}} = \frac{0.3164}{(7.69 \times 10^4)^{0.25}} = 0.0190.$$

De esta manera, se evaluaron los demás valores de v_s , $N_{R(1/2")}$ y f , los cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Determinación del factor de fricción promedio.

H m	v_s m/s	$N_{R(1/2")}$ Adimensional	$f_{1/2" }$ Adimensional	$f_{m(1/2")}$ Adimensional
0.836	4.3196	8.87×10^4	0.0183	0.0201
0.8	4.2370	8.70×10^4	0.0184	
0.7	3.9988	8.21×10^4	0.0187	
0.6	3.7454	7.69×10^4	0.0190	
0.5	3.4737	7.14×10^4	0.0194	
0.4	3.1787	6.53×10^4	0.0198	
0.3	2.8535	5.86×10^4	0.0203	
0.2	2.4860	5.11×10^4	0.0210	
0.1	2.0539	4.22×10^4	0.0221	
0.0	1.0521	3.09×10^4	0.0239	

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, el valor de $f_{m(1/2")}$ se obtiene calculando la media aritmética de los diez valores de $f_{(1/2")}$, es decir:

$$f_{m(1/2")} = \frac{0.0183+0.0184+0.0187+0.0190+0.0194+0.0198+0.0203+0.0210+0.0221+0.0239}{10}$$

$$f_{m(1/2")} = 0.0201.$$

- **Determinación de la cantidad β**

Al relacionar las ecuaciones (34) y (35), se obtiene la ecuación que permite determinar el valor de la cantidad β , esta es:

$$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2")} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2")} \left(\frac{L_{1/2" }}{D_{1/2" }} \right) + f_{m(1/2")} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{VS}}. \quad (51)$$

Donde los valores del coeficiente de resistencia a la entrada de la línea de descarga (K_{Entrada}) y la relación de longitud equivalente para el codo estándar de 90° ($(L_e/D)_{\text{Codo}}$) y la válvula solenoide ($(L_e/D)_{\text{VS}}$), se indican en la tabla 7.

Tabla 7. Determinación de la cantidad β .

K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{VS}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β
Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional
0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915

Fuente: *Elaboración propia.*

El valor de la relación $L_{1/2''}/D_{1/2''} = 24.848$, se obtiene al dividir el valor de la longitud de tubería recta en la línea de descarga ($L_{1/2''} = 0.410$ m) con el valor del diámetro interior de la misma tubería ($D_{1/2''} = 0.0165$ m), los cuales se indicaron en la tabla 4.

Entonces, de esta manera al aplicar la ecuación (51), con los datos que se muestran en la tabla 7, se obtiene el valor de la cantidad β , esto es:

$$\beta = 0.5 + 0.0201 \times (30 + 24.848 + 970) \cong 21.0915.$$

Cabe mencionar que para este caso, se ha utilizado como líquido de trabajo agua a 25°C , de la misma que se indican su densidad (ρ) y viscosidad (μ) en la tabla 5.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

Este procedimiento, se realizó programando en las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2019, las siguientes ecuaciones que se mencionan a continuación:

- Las ecuaciones (48) y (49) para evaluar la velocidad lineal promedio en la línea de descarga y el número de Reynolds, respectivamente.
- La ecuación (50) para evaluar el factor de fricción, correspondiente para cada valor del nivel de líquido en el tanque cónico.

- La ecuación (51) para determinar el valor de la cantidad β .
- La ecuación (20) para determinar el volumen inicial de líquido.
- La ecuación (21) para determinar el nivel final teórico de líquido.
- Las ecuaciones (22) y (23) para determinar el volumen final de líquido, teórico y experimental, respectivamente.
- Las ecuaciones: $Y_i = H_i + z$ y $Y_{f(Teo)} = H_{f(Teo)} + z$, para determinar las cantidades Y_i e $Y_{f(Teo)}$, respectivamente.
- La ecuación (42) para determinar el tiempo programado en el sistema automatizado, realizado en cada prueba de funcionamiento del equipo.

Además, para determinar el volumen de drenaje experimental ($V_{D(Exp)}$), se programó la ecuación (52)

$$V_{D(Exp)} = V_i - V_{f(Exp)}. \quad (52)$$

El relé inteligente que se utilizó en la implementación del sistema automatizado es de la marca Schneider Electric, cuyo modelo es Zelio SR2B121 FU, el cual se programó haciendo uso del software Zelio Soft2 V5.4.2.

3.5. Aspectos éticos

Como tesis y egresados de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, declaramos que nuestro trabajo de tesis es auténtico y no existe plagio de ningún tipo de otro trabajo de tesis o artículo científico, mostrando constancia precisa de todas las fuentes de información que se utilizaron. Asimismo, nos comprometemos a respetar la legitimidad de los resultados obtenidos en las ocho (8) pruebas de funcionamiento que se realizaron del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 8. Resultados teóricos de las variables intervinientes.

Prueba	H_i		V_i		$V_{D(Teo)}$		$V_{f(Teo)}$		$H_{f(Teo)}$	
	m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm
1	0.522	52.2	0.01655	16.55	0.0090	9.00	0.00755	7.55	0.4018	40.18
2	0.697	69.7	0.03940	39.40	0.0100	10.00	0.02940	29.40	0.6322	63.22
3	0.63	63.1	0.02909	29.09	0.0100	10.00	0.01909	19.09	0.5475	54.75
4	0.545	54.5	0.01884	18.84	0.0080	8.00	0.01084	10.84	0.4533	45.33
5	0.450	45.0	0.01060	10.60	0.0070	7.00	0.00360	3.60	0.3140	31.40
6	0.703	70.3	0.04043	40.43	0.0120	12.00	0.02843	28.43	0.6251	62.51
7	0.622	62.2	0.02800	28.00	0.0100	10.00	0.01800	18.00	0.5368	53.68
8	0.5335	53.35	0.01767	17.67	0.0085	8.50	0.00917	9.17	0.4287	42.87

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 9. Evaluación de la cantidad Y .

Prueba	H_i		$H_{f(Teo)}$		Y_i		$Y_{f(Teo)}$	
	m	cm	m	cm	m	cm	m	cm
1	0.522	52.2	0.4018	40.18	0.6370	63.70	0.5168	51.68
2	0.697	69.7	0.6322	63.22	0.8120	81.20	0.7472	74.72
3	0.63	63.0	0.5475	54.75	0.7450	74.50	0.6625	66.25
4	0.545	54.5	0.4533	45.33	0.6600	66.00	0.5683	56.83
5	0.450	45.0	0.3140	31.40	0.5650	56.50	0.4290	42.90
6	0.703	70.3	0.6251	62.51	0.8180	81.80	0.7401	74.01
7	0.622	62.2	0.5368	53.68	0.7370	73.70	0.6518	65.18
8	0.5335	53.35	0.4287	42.87	0.6485	64.85	0.5437	54.37

Fuente: *Elaboración propia.*

En la tabla 8, se muestran los resultados teóricos de las variables intervinientes. Por ejemplo, para obtener los valores de V_i , $H_{f(Teo)}$ y $V_{f(Teo)}$, en la tercera prueba, se

aplicó las ecuaciones (20), (21) y (22), respectivamente, es decir:

$$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 = \frac{\pi}{27} (0.63)^3 = 0.02909 \text{ m}^3 = 29.09 \text{ L.}$$

$$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} = \sqrt[3]{(0.63)^3 - \frac{27 \times 0.0100}{\pi}} = 0.5475 \text{ m.}$$

$$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} = 0.02909 - 0.0100 = 0.01909 \text{ m}^3 = 19.09 \text{ L.}$$

De esta forma, se han obtenido los valores de V_i , $H_{f(\text{Teo})}$ y $V_{f(\text{Teo})}$ en las otras pruebas.

En la tabla 9, se muestran los resultados de las cantidades Y_i e $Y_{f(\text{Teo})}$, los cuales se deben a las ecuaciones $Y_i = H_i + z$ y $Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$, respectivamente. Por ejemplo, para obtener los valores de Y_i e $Y_{f(\text{Teo})}$, en la primera prueba, el cálculo fue el siguiente:

$$Y_i = H_i + z = 0.522 + 0.115 = 0.6370 \text{ m} = 63.70 \text{ cm.}$$

$$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z = 0.4018 + 0.115 = 0.5168 \text{ m} = 51.68 \text{ cm.}$$

Y así sucesivamente, se determinaron los valores de Y_i e $Y_{f(\text{Teo})}$ correspondientes a las demás pruebas.

En la tabla 10, se puede observar los resultados del tiempo programado, correspondiente a cada prueba, lo cual se ha determinado aplicando la ecuación (42); pero para esto, se tuvo que haber determinado los valores de β , Y_i e $Y_{f(\text{Teo})}$. Por ejemplo, para determinar el valor de t_p , correspondiente a la cuarta prueba, se reemplazó las siguientes cantidades en la ecuación (42):

$$\beta = 21.0915, \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \quad R_{\text{TC}} = 0.2942 \text{ m}, \quad H_{\text{TC}} = 0.8826 \text{ m.}$$

$$r_s = 0.00825 \text{ m}, \quad Y_i = 0.6600 \text{ m}, \quad Y_{f(\text{Teo})} = 0.5683 \text{ m.}$$

$$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(Teo)}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(Teo)}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(Teo)}^{1/2}) \right]}$$

$$\sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2} = \sqrt{\frac{(21.0915 + 1)}{2 \times 9.81} \left(\frac{0.2942}{0.8826 \times 0.00825}\right)^2} = 1732.3.$$

$$\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(Teo)}^{5/2}) = \frac{2}{5} \times ((0.6600)^{5/2} - (0.5683)^{5/2}) = 0.0442.$$

$$\frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(Teo)}^{3/2}) = \frac{4}{3} \times 0.115 \times ((0.6600)^{3/2} - (0.5683)^{3/2}) = 0.0165.$$

$$2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(Teo)}^{1/2}) = 2 \times (0.115)^2 ((0.6600)^{1/2} - (0.5683)^{1/2}) = 0.0015.$$

$$t_p = 1732.3 \times (0.0442 - 0.0165 + 0.0015) \cong 50.6 \text{ s.}$$

De la misma forma, se han obtenido los demás valores de t_p , los cuales se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados del tiempo programado en el sistema automatizado.

Prueba	t_p	
	s	min
1	58.6	0.977
2	56.2	0.936
3	59.1	0.985
4	50.6	0.843
5	49.0	0.817
6	67.4	1.124
7	59.5	0.992
8	54.5	0.909

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Comparación de resultados para el nivel final de líquido.

Prueba	$H_{f(Teo)}$		$H_{f(Exp)}$		% Error H_f
	m	cm	m	cm	
1	0.4018	40.18	0.40	40.0	0.46 %
2	0.6322	63.22	0.6310	63.10	0.19 %
3	0.5475	54.75	0.5460	54.60	0.27 %
4	0.4533	45.33	0.4510	45.10	0.50 %
5	0.3140	31.40	0.3180	31.80	1.27 %
6	0.6251	62.51	0.6240	62.40	0.18 %
7	0.5368	53.68	0.5350	53.50	0.34 %
8	0.4287	42.87	0.4270	42.70	0.40 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Comparación de resultados para el volumen final de líquido.

Prueba	$V_{f(Teo)}$		$V_{f(Exp)}$		% Error V_f
	m ³	L	m ³	L	
1	0.00755	7.55	0.00745	7.45	1.37 %
2	0.02940	29.40	0.02923	29.23	0.56 %
3	0.01909	19.09	0.01894	18.94	0.81 %
4	0.01084	10.84	0.01067	10.67	1.49 %
5	0.00360	3.60	0.00374	3.74	3.85 %
6	0.02843	28.43	0.02827	28.27	0.54 %
7	0.01800	18.00	0.01782	17.82	1.01 %
8	0.00917	9.17	0.00906	9.06	1.19 %

Fuente: Elaboración propia.

Los valores experimentales del nivel final de líquido ($H_{f(Exp)}$), que se muestran en la tabla 11, se han obtenido haciendo una inspección al visor del tanque cónico al final de la operación de drenaje; lo cual sirvió para determinar los valores experimentales del volumen final de líquido ($V_{f(Exp)}$) en cada una de las ocho (8) pruebas realizadas,

aplicándose para esto la ecuación (23), los mismos que se pueden observar en la tabla 12. Por ejemplo, para determinar el valor de $V_{f(\text{Exp})}$, correspondiente a la cuarta prueba, el cálculo fue el siguiente:

$$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 = \frac{\pi}{27} \times (0.4510)^3 = 0.01067 \text{ m}^3 = 10.67 \text{ L.}$$

Los valores experimentales del volumen de drenaje ($V_{D(\text{Exp})}$), correspondiente a cada prueba, se han determinado haciendo uso de la (52), los mismos que se pueden observar en la tabla 13. Por ejemplo, para determinar el valor de $V_{D(\text{Exp})}$, correspondiente a la cuarta prueba, el procedimiento se indica a continuación:

$$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} = 0.01884 - 0.01067 = 0.008162 \text{ m}^3 = 8.162 \text{ L.}$$

Tabla 13. Comparación de resultados para el volumen de drenaje.

Prueba	$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error V_D
	m^3	L	m^3	L	
1	0.0090	9.00	0.00910	9.10	1.15 %
2	0.0100	10.00	0.01017	10.17	1.66 %
3	0.0100	10.00	0.01015	10.15	1.55 %
4	0.0080	8.00	0.008162	8.162	2.02 %
5	0.0070	7.00	0.00686	6.86	1.98 %
6	0.0120	12.00	0.01215	12.15	1.29 %
7	0.0100	10.00	0.01018	10.18	1.82 %
8	0.0085	8.50	0.00861	8.61	1.29 %

Fuente: Elaboración propia.

También en las tablas 11, 12 y 13, se muestran la comparación de resultados para el nivel final de líquido, el volumen final de líquido y el volumen de drenaje, respectivamente. Para obtener el porcentaje de error correspondiente, primeramente, se ha determinado el valor absoluto de la diferencia entre el valor experimental y el valor

teórico, luego este valor absoluto se dividió entre el valor teórico y se multiplicó por 100 %. Entonces, para determinar los porcentajes de error del nivel final de líquido, del volumen final de líquido y del volumen de drenaje, correspondiente a la cuarta prueba, el procedimiento fue el siguiente:

% Error H_f

$$\frac{|0.4510 - 0.4533|}{0.4533} \times 100 = 0.50 \%$$

% Error V_f

$$\frac{|0.01067 - 0.01084|}{0.01084} \times 100 = 1.49 \%$$

% Error V_D

$$\frac{|0.008162 - 0.0080|}{0.0080} \times 100 = 2.02 \%$$

En la figura 23, se puede observar la monitorización de la operación de drenaje. Esto indica que, en cada una de las ocho (8) pruebas realizadas, el tiempo programado se escribió en la ventana de parámetros del temporizador TT1, utilizándose para esto una laptop (PC), la misma que estaba conectada al relé programable por medio de la interfaz de comunicación. Asimismo, el prendido de la marca M1 se realizó haciendo un clic sobre el contacto I2, de esta forma se energizó al temporizador TT1 y se prendió a la salida física Q1 del relé programable, la cual estaba conectada a la válvula solenoide. Además, mediante la monitorización se pudo observar en tiempo real en cada una de las ocho (8) pruebas realizadas, el estado de cada uno de los contactos que conforman el diagrama ladder.

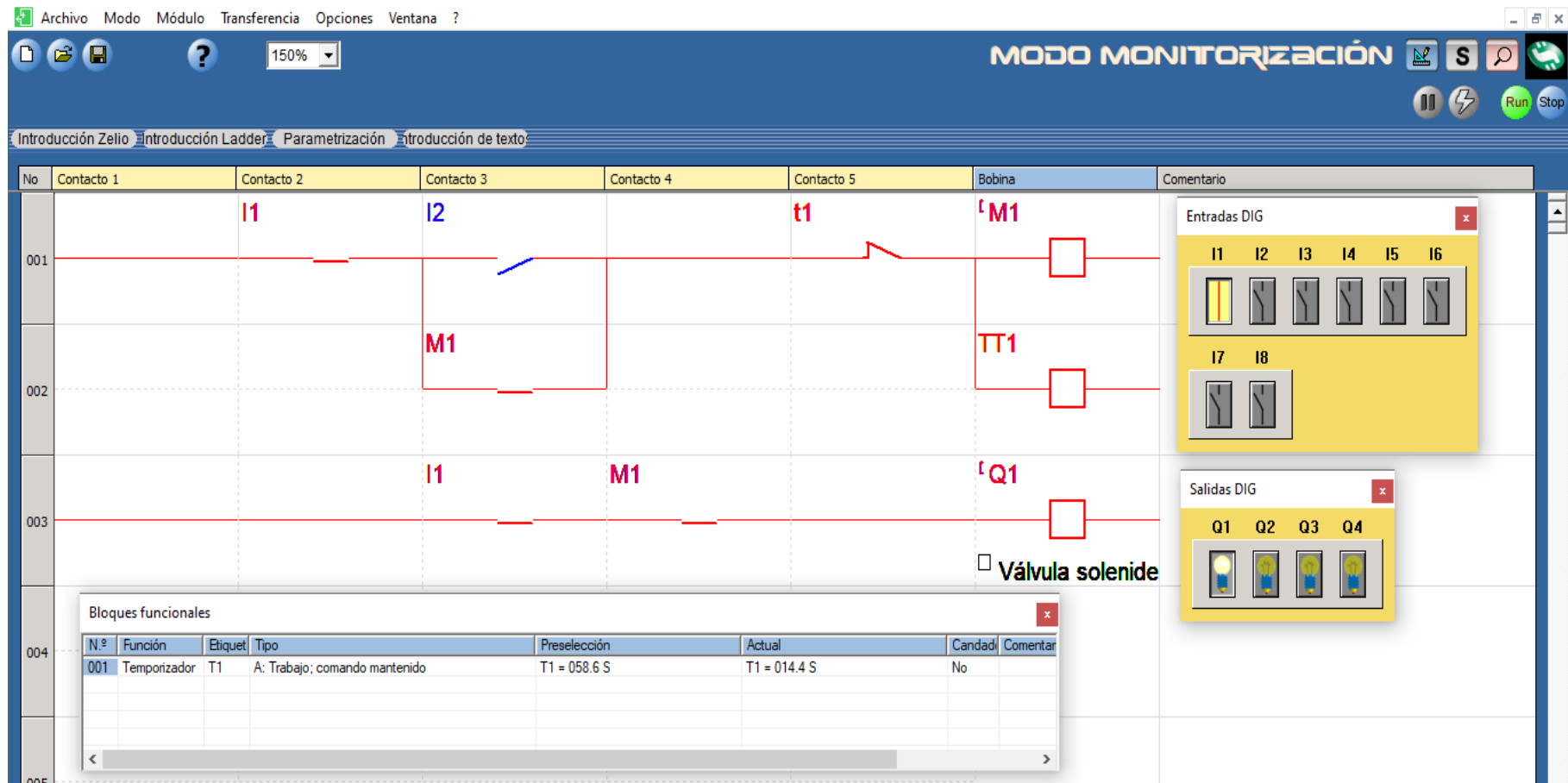


Figura 23. Monitorización de la operación de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

El mínimo porcentaje de error para el nivel final de líquido, el volumen final de líquido y el volumen de drenaje, resultó: 0.18 %, 0.54 % y 1.15 %, respectivamente. De igual manera, el máximo porcentaje de error para el nivel final de líquido, el volumen final de líquido y el volumen de drenaje, resultó: 1.27 %, 3.85 % y 2.02 %, respectivamente. Dichos valores se muestran correspondientemente en las tablas 11, 12 y 13.

Flores, López y Menéndez (2012, pp. 57-58), realizaron cuatro pruebas en el equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, de las cuales obtuvieron los siguientes resultados: el mínimo y máximo porcentaje de error del volumen de drenaje fue 0.65 % y 2.25 %, respectivamente. Entonces, al comparar dichos resultados, con los resultados que se muestran en la tabla 13 (mínimo = 1.15 % y máximo = 2.02 %), se puede decir que los resultados obtenidos en el presente trabajo son muy exactos y precisos (mayores al 95 % de confiabilidad); lo cual indica que la ecuación (42) que se dedujo en la sección 3.1.2, representa un modelo matemático predictivo que permite determinar con gran confiabilidad, el tiempo para drenar una cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos, pues los porcentajes de error que se obtuvieron al aplicar este modelo resultaron por debajo del 5 %.

También, en las cuatro pruebas realizadas por Flores, López y Menéndez (2012, pp. 1-81), el tiempo de drenaje lo ponían directamente en la pantalla del relé programable, lo cual resultaba dificultoso, pues el relé programable sólo cuenta con las cuatro teclas direccionales, la tecla ok y la tecla esc. En el presente trabajo se utilizó la interfaz de comunicación con puertos COM y USB, los mismos que se conectaron al relé programable y a la PC (laptop); de esta forma el tiempo programado en el sistema automatizado se escribió en la ventana de parámetros del temporizador TT1 (figura 19), utilizándose para esto el software Zelio Soft2 V5.4.2. De esta manera, el prendido de la válvula solenoide se realizó desde la PC, haciendo un clic sobre el contacto I2. Esto a su vez, permitió observar en tiempo real, el estado de cada uno de los componentes del diagrama ladder. Por lo tanto, se puede decir que, mediante la implementación del sistema automatizado, se ha realizado el mejoramiento del equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- Mediante la ecuación (21), se ha podido demostrar que existe relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico. Dicha ecuación se ha aplicado para determinar los resultados teóricos del nivel final de líquido en cada una de las ocho (8) pruebas realizadas, los cuales se muestran en las tablas 9 y 11. De esta forma se ha cumplido con el primer objetivo específico y a su vez se ha probado la primera hipótesis específica.
- Al deducir la ecuación (42), se ha probado que existe relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico, dicha ecuación ha permitido determinar el tiempo programado en el sistema automatizado en cada una de las ocho (8) pruebas realizadas, cuyos resultados se muestran en la tabla 10, cumpliéndose de esta forma con el segundo objetivo específico y al mismo tiempo probándose la segunda hipótesis específica.
- En la sección 3.1.4, se ha determinado que los componentes principales del diagrama ladder, para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, son: dos entradas y una salida física del relé programable, una marca de enclavamiento y un temporizador. De esta manera se está cumpliendo con el tercer objetivo específico y probándose la tercera hipótesis específica.
- Al obtener el sistema de ecuaciones formado por (43), (44) y (45), se está probando que existe el sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionan el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador; de este modo se ha cumplido con el cuarto objetivo específico y la vez se ha probado la cuarta hipótesis específica.
- Entonces, se puede decir, que se ha realizado el mejoramiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, mediante la implementación de un sistema automatizado; cumpliéndose de esta forma con el objetivo general y a su vez probándose la hipótesis general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la implementación con sistemas automatizados a otros equipos del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la FIQ-UNAP, tales como el tanque cilíndrico horizontal y el tanque cilíndrico vertical. Esto permitiera realizar estudios, en lo que se refiere al control automático del llenado y vaciado de líquidos en tanques con geometría cilíndrica.
- Se recomienda utilizar la ecuación (20), para determinar el volumen inicial de líquido en el tanque cónico, conociéndose previamente el nivel de líquido correspondiente.
- Se recomienda utilizar la ecuación (21), para determinar el valor teórico del nivel final de líquido en el tanque cónico, conociéndose previamente el nivel inicial de líquido y el volumen de drenaje.
- Se recomienda utilizar las ecuaciones (48), (49) y (50), para evaluar en la línea descarga del tanque cónico, la velocidad lineal promedio, el número de Reynolds y el factor de fricción, respectivamente.
- Específicamente, para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, se recomienda utilizar la ecuación (42), para determinar el tiempo requerido para drenar una cierta cantidad de líquido.
- Se recomienda que el mencionado equipo, cuando ya esté implementado con el sistema automatizado, se instale en un lugar del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la FIQ-UNAP, el cual debe contar con una toma de corriente de 220 V y un grifo de agua para el llenado del tanque cónico.
- Se recomienda hacer una revisión permanente de todos los componentes del sistema automatizado (relé programable, válvula solenoide, llave térmica, conexiones eléctricas, pulsadores y piloto indicador), esto con la finalidad de impedir incidentes que puedan alterar el funcionamiento de la válvula solenoide y el relé programable.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

- BRAVO, Steeven. Cálculo de pérdidas de cargas de diferentes accesorios utilizados en tuberías a presión en el Laboratorio de Hidráulica UNESUM. Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil. Manabí, Ecuador: Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Técnicas, Carrera de ingeniería Civil, 2020. pp. 14-16, 18-20.
- 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. 12-14, 21, 26, 28, 31-34.
- 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, 15-17.
- DÍAZ, Nadia. Diseño de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios. Tesis para optar el título de profesional de Ingeniera Civil en Obras Civiles. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de ingeniería Civil en Obras Civiles, 2018. pp. 27, 30, 32-33.
- ESPINOZA, Janeth y PEZO, Arlington. Construcción e instalación de un equipo para determinar la relación entre la altura dinámica y el caudal en electrobombas periféricas. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. xiv, 1-77.
- FLORES, David; LÓPEZ, Rossmery y MENÉNDEZ, Karen. Diseño, construcción e instalación de un equipo para el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos. Tesis para optar el título profesional de ingeniero

químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2012. pp. ii, 1-74.

LÓPEZ, Juan. Diseño, construcción y control de una planta de llenado y vaciado de tanques. Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial. Jaén, España: Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2018. pp. 1-39.

- MUÑOZ, Fabián y TORRES, Víctor. Diseño y construcción de inductores de baja potencia de fabricación nacional aplicada en válvulas solenoides. Trabajo Final de Graduación previo a la obtención del título de ingeniero mecánico. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, 2017. pp. 6-7.
- NIÑO, Jhoan y GARCÍA, Michele. Diseño y optimización del sistema de drenaje de las aguas pluviales de la urbanización El Chilcal. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Piura, Perú: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, 2021. pp. 3-165.
- RODRÍGUEZ, Julián; CERDÁ, Luis y BEZOS, Roberto. Automatismos Industriales. 2a. ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2022. pp. 7, 313, 336, 345, 350, 358.
ISBN 13: 978-84-1366-161-2.
- SARAVIA, Edgar. Diseño de un módulo educativo para mejorar la enseñanza en el área de control y automatización de la Universidad de Ciencias y Humanidades. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico con mención en Telecomunicaciones. Lima, Perú: Universidad de Ciencias y Humanidades, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica con mención en Telecomunicaciones, 2019. pp. 15-16, 22-23.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿Cuál es el sistema automatizado a implementarse para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Existirá alguna relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico? • ¿Existirá alguna relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico? • ¿Cuáles son los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos? • ¿Existirá algún sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionen el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador? 	<p>Objetivo general Realizar el mejoramiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, mediante la implementación de un sistema automatizado.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico. • Determinar la relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico. • Determinar los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos. • Obtener el sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionen el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador. 	<p>Hipótesis general El sistema automatizado a implementarse para el mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, debe estar conformado por los siguientes componentes: un relé programable, una interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un pulsador rojo NC, un pulsador verde NA, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe relación entre el nivel final, el nivel inicial y el volumen de líquido que se desea drenar en un tanque cónico. • Existe relación entre el tiempo programado en el sistema automatizado con los niveles inicial y final de líquido en un tanque cónico. • Los componentes principales del diagrama ladder para realizar la simulación y el control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos, deben ser: dos entradas y una salida física del relé programable, una marca de enclavamiento y un temporizador. • Existe el sistema de ecuaciones, mediante el cual se relacionan el estado de las entradas, el estado de la salida física del relé programable, el estado de la marca de enclavamiento y el estado del temporizador. 	<p>Variables independientes En el control automático I1 e I2: estado de las entradas del relé que se conectan a los pulsadores I1(NC) e I2(NA). En el drenaje H_i: nivel inicial de líquido. V_D: volumen de drenaje.</p> <p>Variables intervinientes En el control automático M1: estado de la marca M1. TT1: estado del temporizador. En el drenaje V_i: volumen inicial de líquido. H_f: nivel final de líquido. V_f: volumen final de líquido.</p> <p>Variables dependientes En el control automático Q1: estado de la salida física del relé que se conecta a la válvula solenoide. En el drenaje t_p: tiempo programado en el sistema automatizado.</p>	<p>Abierto: 0 Cerrado: 1</p> <p>m m^3</p> <p>Apagado: 0 Prendido: 1</p> <p>m^3</p> <p>m m^3</p> <p>Apagado: 0 Prendido: 1</p> <p>s</p>	<p>Tipo de investigación La presente investigación tiene enfoque cuantitativo, es del tipo aplicada con diseño correlacional.</p> <p>Población En el control automático Estuvo conformada por la cantidad total de elementos del diagrama ladder, lo cual resultó igual a siete (7).</p> <p>En el drenaje Lo representan las múltiples pruebas de funcionamiento que se pueden realizar en el equipo.</p> <p>Muestra En el control automático Se consideró únicamente como muestra, a la salida física Q1 del relé programable, debido a que está salida se debe conectar a la válvula solenoide.</p> <p>En el drenaje El tamaño de muestra fue igual a las ocho (8) pruebas de funcionamiento que se realizaron en el equipo.</p>

Anexo 2. Hoja de cálculo para la determinación del factor de fricción promedio.

X7 f_x =PROMEDIO(W7:W16)								
	Q	R	S	T	U	V	W	X
4								
5		g	z	H	v_s	$N_{R(1/2")}$	$f_{1/2"}$	$f_{m(1/2")}$
6		m/s ²	m	m	m/s	Adimensional	Adimensional	Adimensional
7		9.81	0.115	0.836	4.3196	8.87E+04	0.0183	0.0201
8				0.8	4.2370	8.70E+04	0.0184	
9		$v_s = \sqrt{2g(H+z)}$. (48)		0.7	3.9988	8.21E+04	0.0187	
10				0.6	3.7454	7.69E+04	0.0190	
11		$N_{R(1/2")} = \frac{v_s D_{1/2"} \rho}{\mu}$. (49)		0.5	3.4737	7.14E+04	0.0194	
12				0.4	3.1787	6.53E+04	0.0198	
13				0.3	2.8535	5.86E+04	0.0203	
14		$f_{1/2"} = \frac{0.3164}{N_{R(1/2")}^{0.25}}$. (50)		0.2	2.4860	5.11E+04	0.0210	
15				0.1	2.0539	4.22E+04	0.0221	
16				0.0	1.5021	3.09E+04	0.0239	
17								
18								
19		g	z	ρ	μ	$D_{1/2"}$		
20		m/s ²	m	kg/m ³	Pa.s	m		
21		9.81	0.115	996	0.0008	0.0165		

Anexo 3. Hoja de cálculo para la prueba 1.

$B15 \quad =(((L6+1)/(2*M6))^{1/2})*((B6/(C6*F6))^{1/2})*((2/5)*(((L10)^{5/2})-((N10)^{5/2}))-((4/3)*N6*(((L10)^{3/2})-((N10)^{3/2}))+2*(N6^2)*(((L10)^{1/2})-((N10)^{1/2}))))$														
B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO														
$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D}\right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}}\right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D}\right)_{\text{VS}} \cdot (51)$														
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{VS}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$	
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m		
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$	
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$		
m		cm		m ³		L		m		m		cm		
0.522		52.2		0.01655		16.55		0.0090		9.0000		0.00755		
7.55		40.18		40.18		0.6370		63.70		0.5168		51.68		
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f		% Error V_f		% Error V_D		
s		min		m		cm		m ³		L		m ³		
58.6		0.977		0.4000		40.00		0.00745		7.45		0.00910		
9.103		0.46%		1.37%		1.15%								
$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \cdot (20)$														
$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \cdot (23)$														
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \cdot (42)$														
$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \cdot (21)$														
$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \cdot (22)$														
$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \cdot (52)$														

Anexo 4. Hoja de cálculo para la prueba 2.

$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{VS}} \quad (51)$															
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{VS}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$		
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$		
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115			
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$			
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm		
0.697	69.7	0.03940	39.40	0.0100	10.0000	0.02940	29.40	0.6322	63.22	0.8120	81.20	0.7472	74.72		
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \quad (20)$				
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \quad (23)$				
56.2	0.936	0.6310	63.10	0.02923	29.23	0.01017	10.17	0.19%	0.56%	1.66%					
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \quad (42)$								$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \quad (21)$				$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \quad (22)$			
												$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \quad (52)$			

Anexo 5. Hoja de cálculo para la prueba 3.

B15 : X ✓ fx =(((L6+1)/(2*M6))^(1/2))*((B6/(C6*F6))^2)*((2/5)*(((L10)^(5/2))-((N10)^(5/2)))-((4/3)*N6*(((L10)^(3/2))-((N10)^(3/2))))+2*(N6^2)*(((L10)^(1/2))-((N10)^(1/2)))

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO													
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	$K_{Entrada}$	$(L_e/D)_{Codo}$	$(L_e/D)_{V8}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m	$Y_i = H_i + z$
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(Teo)} = H_{f(Teo)} + z$
H_i	V_i	$V_{D(Teo)}$	$V_{f(Teo)}$	$H_{f(Teo)}$	Y_i	$Y_{f(Teo)}$							
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm
0.63	63	0.02909	29.09	0.0100	10.0000	0.01909	19.09	0.5475	54.75	0.7450	74.50	0.6625	66.25
t_p	$H_{f(Exp)}$	$V_{f(Exp)}$	$V_{D(Exp)}$	% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D							
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L						
59.1	0.985	0.5460	54.60	0.01894	18.94	0.01015	10.15	0.27%	0.81%	1.55%			
$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \cdot (20)$													
$V_{f(Exp)} = \frac{\pi}{27} H_{f(Exp)}^3 \cdot (23)$													
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(Teo)}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(Teo)}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(Teo)}^{1/2}) \right] \cdot (42)$													
$H_{f(Teo)} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(Teo)}}{\pi}} \cdot (21)$													
$V_{f(Teo)} = V_i - V_{D(Teo)} \cdot (22)$													
$V_{D(Exp)} = V_i - V_{f(Exp)} \cdot (52)$													

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

Anexo 6. Hoja de cálculo para la prueba 4.

B15 $=(((L6+1)/(2*M6))^{1/2})*((B6/(C6*F6))^{1/2})*((2/5)*(((L10)^{5/2})-((N10)^{5/2}))-4/3)*N6*(((L10)^{3/2})-((N10)^{3/2}))+2*(N6^2)*(((L10)^{1/2})-((N10)^{1/2}))$

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO													
$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{vs}} \cdot (51)$													
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{vs}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m	
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$	
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm
0.545	54.5	0.01884	18.84	0.0080	8.0000	0.01084	10.84	0.4533	45.33	0.6600	66.00	0.5683	56.83
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \cdot (20)$		
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \cdot (23)$		
50.6	0.843	0.4510	45.10	0.01067	10.67	0.008162	8.162	0.50%	1.49%	2.02%			
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \cdot (42)$													
$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \cdot (21)$													
$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \cdot (22)$													
$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \cdot (52)$													

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

Anexo 7. Hoja de cálculo para la prueba 5.

$=(((L6+1)/(2*M6))^{1/2})*((B6/(C6*F6))^{1/2})*((2/5)*(((L10)^{5/2})-((N10)^{5/2}))-((4/3)*N6*(((L10)^{3/2})-((N10)^{3/2}))+2*(N6^2)*(((L10)^{1/2})-((N10)^{1/2})))$															
B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO															
$\beta = K_{Entrada} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D}\right)_{Codo} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}}\right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D}\right)_{VS} \quad (51)$															
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	$K_{Entrada}$	$(L_e/D)_{Codo}$	$(L_e/D)_{VS}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$		
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m			
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(Teo)} = H_{f(Teo)} + z$		
H_i		V_i		$V_{D(Teo)}$		$V_{f(Teo)}$		$H_{f(Teo)}$		Y_i		$Y_{f(Teo)}$			
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm		
0.45	45	0.01060	10.60	0.0070	7.0000	0.00360	3.60	0.3140	31.40	0.5650	56.50	0.4290	42.90		
t_p		$H_{f(Exp)}$		$V_{f(Exp)}$		$V_{D(Exp)}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \quad (20)$				
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(Exp)} = \frac{\pi}{27} H_{f(Exp)}^3 \quad (23)$				
49.0	0.817	0.3180	31.80	0.00374	3.74	0.00686	6.86	1.27%	3.85%	1.98%					
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s}\right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(Teo)}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(Teo)}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(Teo)}^{1/2}) \right] \quad (42)$								$H_{f(Teo)} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(Teo)}}{\pi}} \quad (21)$				$V_{f(Teo)} = V_i - V_{D(Teo)} \quad (22)$		$V_{D(Exp)} = V_i - V_{f(Exp)} \quad (52)$	
<p style="text-align: center;">Prueba 1 Prueba 2 Prueba 3 Prueba 4 Prueba 5 Prueba 6 Prueba 7 Prueba 8 Hc ...</p>															

Anexo 8. Hoja de cálculo para la prueba 6.

$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{VS}} \cdot (51)$														
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO														
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{VS}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$	
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m		
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$	
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$		
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm	
0.703	70.3	0.04043	40.43	0.0120	12.0000	0.02843	28.43	0.6251	62.51	0.8180	81.80	0.7401	74.01	
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \cdot (20)$			
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \cdot (23)$			
67.4	1.124	0.6240	62.40	0.02827	28.27	0.01215	12.15	0.18%	0.54%	1.29%				
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \cdot (42)$										$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \cdot (21)$		$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \cdot (22)$		
										$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \cdot (52)$				

Anexo 9. Hoja de cálculo para la prueba 7.

=(((L6+1)/(2*M6))^(1/2))*((B6/(C6*F6))^2)*((2/5)*(((L10)^5/2))-((N10)^(5/2)))-(4/3)*N6*(((L10)^(3/2))-((N10)^(3/2)))+2*(N6^2)*(((L10)^(1/2))-((N10)^(1/2))))															
B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO											$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2)} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2)} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2)} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{VS}} \quad (51)$				
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{VS}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2)}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$		
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m			
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$		
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$			
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm		
0.622	62.2	0.02800	28.00	0.0100	10.0000	0.01800	18.00	0.5368	53.68	0.7370	73.70	0.6518	65.18		
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \quad (20)$				
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \quad (23)$				
59.5	0.992	0.5350	53.50	0.01782	17.82	0.01018	10.18	0.34%	1.01%	1.82%					
$t_p = \frac{(\beta + 1)}{2g} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \quad (42)$								$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \quad (21)$				$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \quad (22)$			
								$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \quad (52)$							

Anexo 10. Hoja de cálculo para la prueba 8.

$\beta = K_{\text{Entrada}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Codo}} + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_{1/2''}}{D_{1/2''}} \right) + f_{m(1/2'')} \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{vs}} \cdot (51)$														
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DRENAJE EN UN TANQUE CÓNICO														
R_{TC}	H_{TC}	$L_{1/2''}$	$D_{1/2''}$	r_s	K_{Entrada}	$(L_e/D)_{\text{Codo}}$	$(L_e/D)_{\text{vs}}$	$L_{1/2''}/D_{1/2''}$	$f_{m(1/2'')}$	β	g	z	$Y_i = H_i + z$	
m	m	m	m	m	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	Adimensional	m/s ²	m		
0.2942	0.8826	0.410	0.0165	0.00825	0.5	30	970	24.848	0.0201	21.0915	9.81	0.115	$Y_{f(\text{Teo})} = H_{f(\text{Teo})} + z$	
H_i		V_i		$V_{D(\text{Teo})}$		$V_{f(\text{Teo})}$		$H_{f(\text{Teo})}$		Y_i		$Y_{f(\text{Teo})}$		
m	cm	m ³	L	m ³	L	m ³	L	m	cm	m	cm	m	cm	
0.5335	53.35	0.01767	17.67	0.0085	8.5000	0.00917	9.17	0.4287	42.87	0.6485	64.85	0.5437	54.37	
t_p		$H_{f(\text{Exp})}$		$V_{f(\text{Exp})}$		$V_{D(\text{Exp})}$		% Error H_f	% Error V_f	% Error V_D	$V_i = \frac{\pi}{27} H_i^3 \cdot (20)$			
s	min	m	cm	m ³	L	m ³	L				$V_{f(\text{Exp})} = \frac{\pi}{27} H_{f(\text{Exp})}^3 \cdot (23)$			
54.5	0.909	0.4270	42.70	0.00906	9.06	0.0086	8.61	0.40%	1.19%	1.29%				
$t_p = \sqrt{\frac{(\beta + 1)}{2g}} \left(\frac{R_{TC}}{H_{TC} r_s} \right)^2 \left[\frac{2}{5} (Y_i^{5/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{5/2}) - \frac{4}{3} z (Y_i^{3/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{3/2}) + 2z^2 (Y_i^{1/2} - Y_{f(\text{Teo})}^{1/2}) \right] \cdot (42)$						$H_{f(\text{Teo})} = \sqrt[3]{H_i^3 - \frac{27V_{D(\text{Teo})}}{\pi}} \cdot (21)$				$V_{f(\text{Teo})} = V_i - V_{D(\text{Teo})} \cdot (22)$				
										$V_{D(\text{Exp})} = V_i - V_{f(\text{Exp})} \cdot (52)$				

Anexo 11. Vistas de las pruebas de funcionamiento del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos.



Anexo 12. Especificaciones técnicas de los componentes del sistema automatizado.

Válvula solenoide

Marca: KLQD.

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

Voltaje: 220 VAC.

Presión de fluido: 0 a 1.0 Mpa.

Relé programable

Marca: Schneider Electric.

Modelo: Zelio SR2 B121FU.

Alimentación: 100–240 VAC.

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

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

Llave térmica

Marca: Schneider Electric.

Amperaje: 2×16 A.

Anexo 13. Manual de instrucciones del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos.

- Para determinar el nivel inicial de líquido, se debe hacer una inspección al visor del tanque cónico (figura A3). Este valor se debe escribir en cm, en la celda C10 de la hoja de cálculo. Entonces, automáticamente se debe obtener, el valor del nivel inicial de líquido en la celda B10 en m y el valor del volumen inicial de líquido en las celdas D10 (en m³) y E10 (en L) (figura A3). En este caso se hace uso de la ecuación **(20)**.
- Seguidamente, se debe escribir en la celda G10 (en L), el valor del volumen de líquido que se desea drenar; de esta forma se obtiene en la celda F10, el valor correspondiente en m³ (figura A3).
- Inmediatamente, se haga el ingreso de los valores del nivel inicial de líquido en la celda C10 (en cm) y del volumen de líquido que se desea drenar en la celda G10 (en L), automáticamente se obtiene el valor teórico del nivel final de líquido en las celdas J10 (en m) y K10 (en cm). En este caso se ha hecho uso de la ecuación **(21)**. Además, también se obtienen automáticamente el valor de Y_i en las celdas L10 (en m) y M10 (en cm) y el valor de $Y_{f(T_{e0})}$ en las celdas N10 (en m) y O10 (en cm) (figura A3).
- También, al ingresar el valor del nivel inicial de líquido en la celda C10 (en cm) y del volumen de líquido que se desea drenar en la celda G10 (en L), automáticamente se obtiene el valor del tiempo programado en el sistema automatizado en las celdas B15 (en s) y C15 (en min) (figura A3). En este caso se ha hecho uso de la ecuación **(42)**.
- Para determinar el valor experimental del nivel final de líquido, se debe hacer nuevamente una inspección al visor del tanque cónico (figura A3). Este valor se debe escribir en la celda E15 (en cm) de la hoja de cálculo, de esta forma se determina el valor correspondiente en la celda D15 (en m). Entonces, de esta forma también se determinan automáticamente los porcentajes de error del nivel final de líquido, del volumen final de líquido y del volumen de drenaje, en las celdas J15, K15 y L15, respectivamente (figura A3).
- El valor de la cantidad β , se ha determinado haciendo uso de la ecuación **(51)**. Para

eso es necesario conocer el coeficiente de resistencia a la entrada de la línea de descarga, las dimensiones de la línea de descarga (longitud de tubería recta y diámetro interior), la relación de longitud equivalente en cada uno de los accesorios de la línea de descarga y el factor de fricción promedio (figura A3).



Figura A1. Vista real del equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos, después de ser implementado mediante el sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

- Los puertos COM y USB de la interfaz de comunicación se deben conectar al relé programable y a la PC (laptop) (figura A2).
- Los pulsadores: rojo (NC) y verde (NA), están conectados a las entradas I1 e I2 del relé programable (figura A2).
- La válvula solenoide está conectada a la salida física Q1 del relé programable (figura A2) y para prenderla basta con hacer un clic desde la laptop sobre el contacto I2 (figura A4).

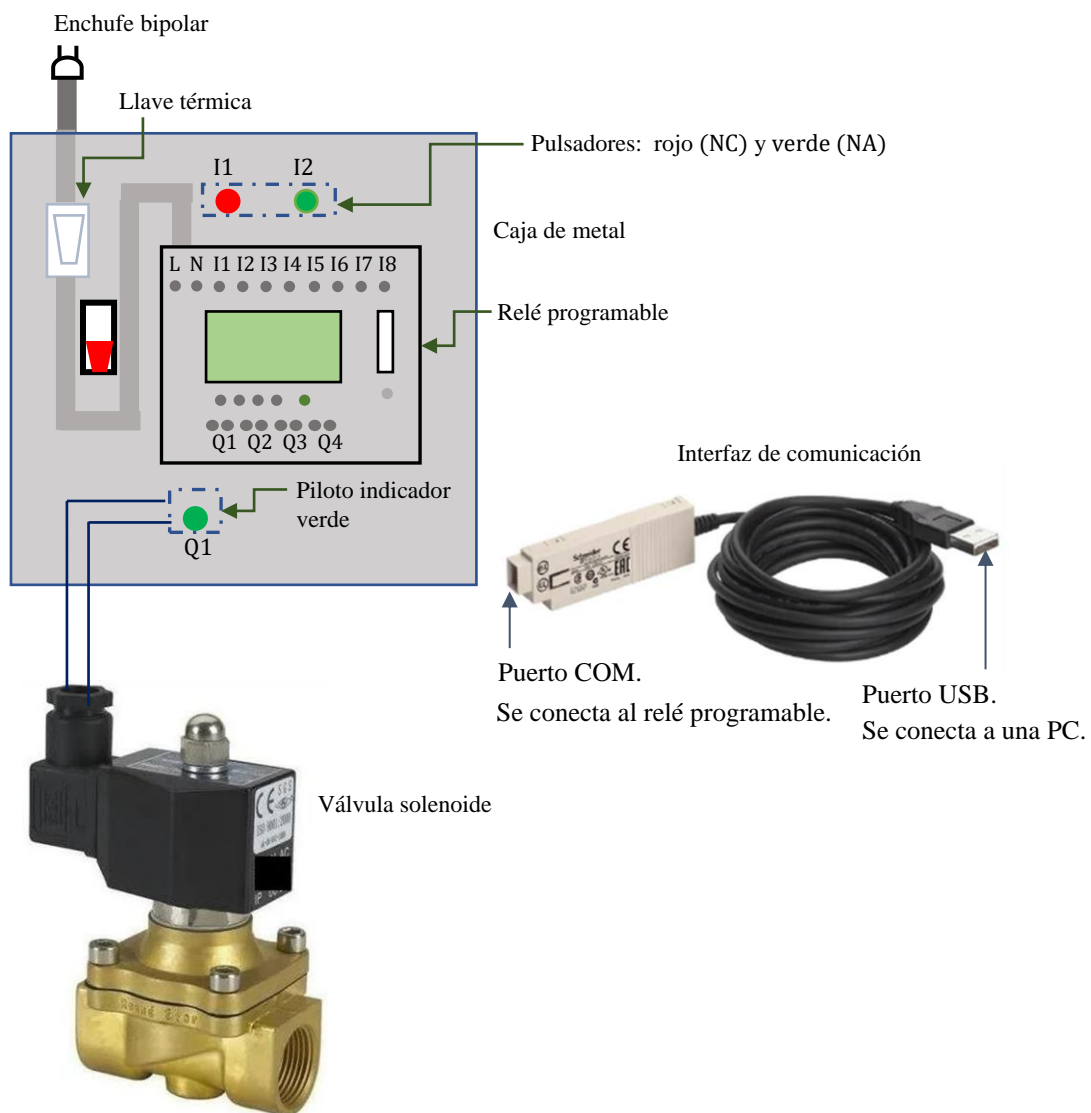


Figura A2. Detalle del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

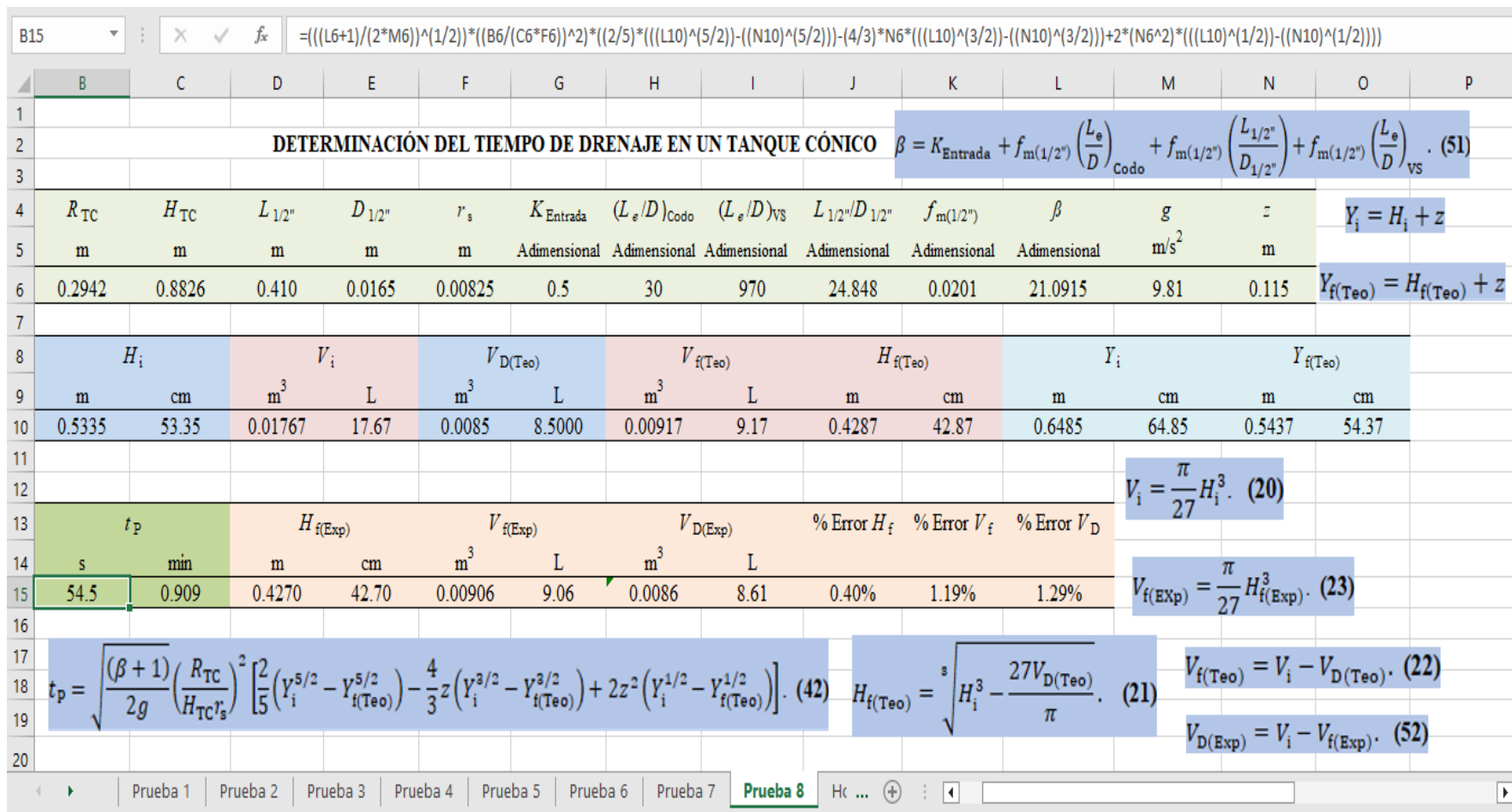


Figura A3. Hoja de cálculo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos.

Fuente: Elaboración propia.

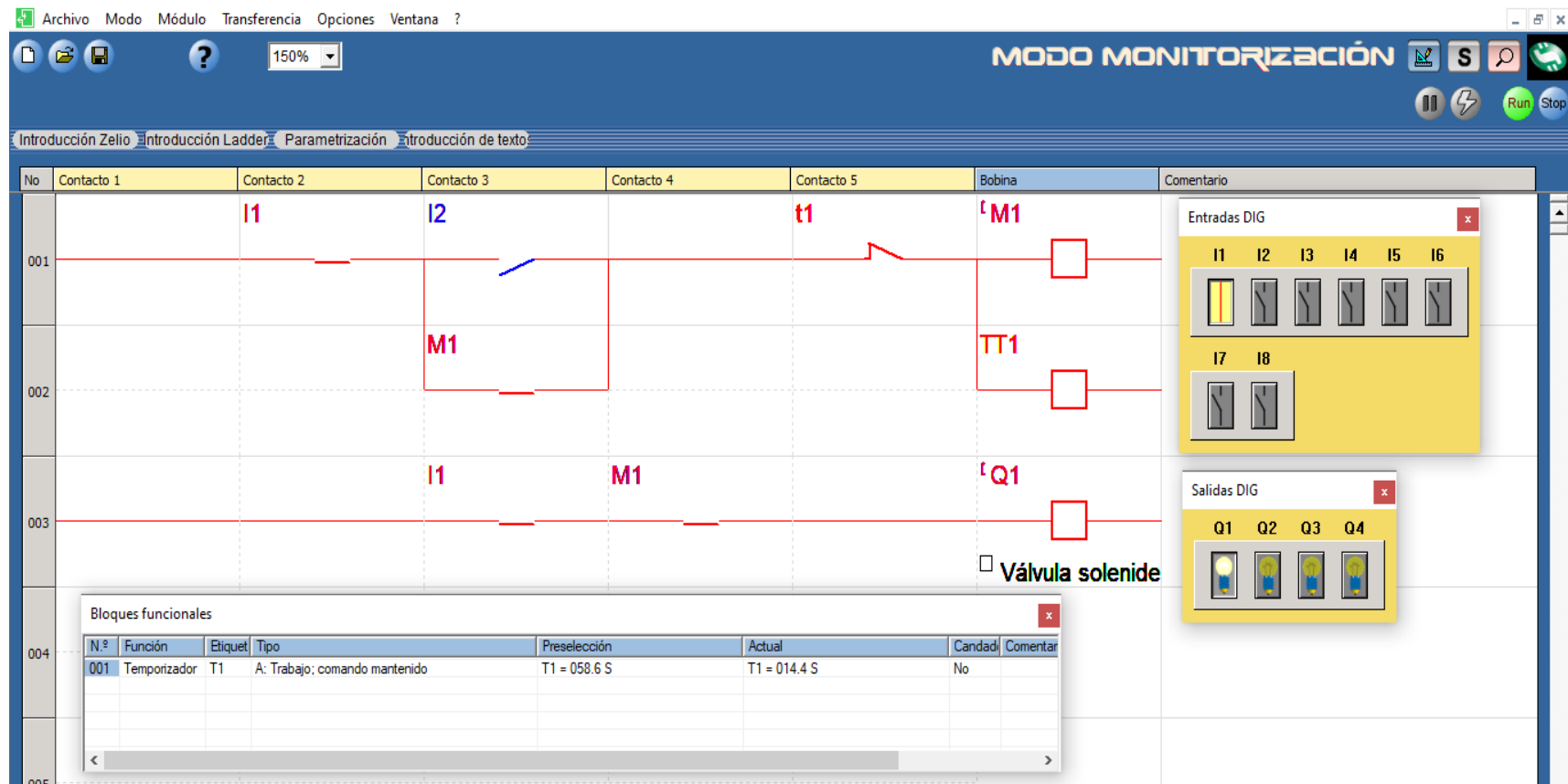


Figura A4. Monitorización de la operación de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.