



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Mecánica

Fecha: 01 de agosto del 2024

Autores: Camilo Rios Cadavid y Juan Daniel López Niño

Nombre del Proyecto de Grado: Validación del diseño mecánico y control de una planta de flujo y nivel

Director: Hader Alberto Madera Bermeo

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado
en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana para optar el
título de Ingeniero Mecánico.

Dr. CAMILO ROCHA

Decano de la Facultad de Ingeniería



Dra. ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ

Directora de la Carrera de Ingeniería Mecánica.



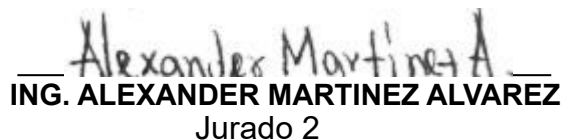
ING. HADER ALBERTO MADERA BERMEO

Director(a) Trabajo



ING. JOSÉ LUIS GERARDO RAMÍREZ DUQUE

Jurado 1



ING. ALEXANDER MARTÍNEZ ÁLVAREZ

Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Validación del Diseño Mecánico y Control de una Planta de Nivel

Camilo Ríos Cadavid
Juan Daniel López Niño

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2024

Validación del Diseño Mecánico y Control de una Planta de Nivel

Camilo Ríos Cadavid
Juan Daniel López Niño

Director (a):

Hader Alberto Madera Bermeo

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia

Declaración de obra original

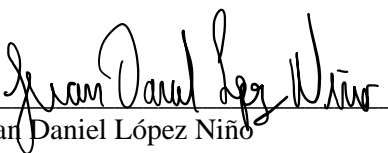
Nosotros declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontifica Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa nuestro trabajo original, excepto donde hemos reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

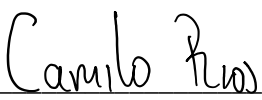
Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Juan Daniel López Niño



Camilo Ríos Cadavid

Tabla de contenido

Lista de Figuras	9
Lista de tablas.....	10
1. Descripción del Problema	13
1.1 Problema de Investigación	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 Justificación del Problema	14
1.3.1 Importancia de la Validación Educativa con Laboratorios Virtuales.....	14
1.3.2 Contexto Tecnológico y Educativo	15
1.3.3 Beneficios y Oportunidades	15
1.4 Restricciones de diseño	16
1.5 Alcances y Limitaciones	17
1.5.1 Alcances	17
1.5.2 Limitaciones.....	18
2. Marco de Referencia	19
2.1 Marco Teórico	19
2.2 Estado del arte.....	22
2.2.1 Planta de flujo y nivel actual	22
2.2.2 Plantas y desarrollos actuales.....	24
2.2.3 Estudios de referencia	27
3. Metodología	29
3.1 Realizar los cálculos hidráulicos del sistema de la planta.....	29
3.1.1 Diagrama esquemático del sistema.	29
3.1.2 Identificar fuentes de entrada y salida de flujo.	30
3.1.3 Identificación y cuantificación de accesorios en cada tramo de tubería.	30
3.1.4 Selección de ecuaciones a aplicar.	31
3.1.5 Elección del simulador y desarrollo de simulaciones.	31
3.2 Implementar un sistema de instrumentación básica de la planta.....	32
3.2.1 Diseño del P&ID y Selección de Instrumentos	32
3.2.2 Simulación practica de componentes principales del sistema PID	33

3.2.3 Conexión y Control en el Entorno de Simulación.....	33
3.2.4 Pruebas de Simulación	34
3.3 Análisis de Esfuerzos y Desplazamiento del tanque de control	34
3.3.1 Evaluación estructural.....	34
3.3.2 Análisis de desplazamiento	35
3.3.3 Análisis de los resultados	35
3.4 Evaluar el desempeño mediante softwares de simulación para el proceso completo de la planta.....	35
3.4.1 Definición de los parámetros del sistema.....	35
3.4.2 Desarrollo del modelo matemático	36
3.4.3 Implementación del modelo en herramientas de simulación	36
3.4.4 Validación del desempeño simulado del sistema de lazo cerrado.....	36
4. Resultados del Proyecto	36
4.1 Análisis de Tuberías en Pipe Flow Expert.....	36
4.1.1 Creación de diagrama esquemático.....	36
4.1.2 Fuentes de entrada y salida de flujo.	40
4.1.3 Identificación y cuantificación de accesorios.....	41
4.1.3 Ecuaciones para el cálculo hidráulico del sistema.	45
4.1.4 Desarrollo de simulaciones.	48
4.2 Implementación de instrumentación básica.	60
4.2.1 Diagrama P&ID.	60
4.2.2 Ubicación y componentes del sistema P&ID.....	62
4.2.3 Evaluación del sistema primario de instrumentación en Workbench.	65
4.2.3.1 Simulación de sensores y actuadores	66
4.2.3.2 Simulación de transmisor de nivel.	69
4.2.4 Proceso de escalado.....	70
4.2.5 Diseño de interfaz de simulación.	70
4.3 Resultados del análisis estructural y de desplazamiento del tanque TK02	72
4.3.1 Condiciones de frontera	73
4.3.3 Estado de los tanques de la planta original	75
4.3.4 Diseño de Rehabilitación	77
4.3.5 Validación y Estabilidad del Funcionamiento.	78
4.3.5.3 Verificación con Estándares.....	79
4.4 Evaluación del Desempeño mediante Software de Simulación para el Proceso Completo de la Planta.....	80

4.4.1 Descripción del sistema.....	80
4.4.2 Datos del sistema.....	80
4.4.3 Modelo matemático del sistema.....	81
4.4.4 Ecuación de Balance de Masa.....	81
5. Conclusiones	85
5.1 Estabilización del modelo dinámico del proceso	85
5.2 Desempeño del Sistema de Control PID Simulado.....	86
5.3 Comparación de los parámetros de control entre las pruebas de laboratorio y el modelo dinámico del proceso	86
5.4 Hidráulica del sistema	87
5.5 Coeficiente de uniformidad.....	87
5.6 Impacto Educativo	87
6. Recomendaciones.....	88
6.1 Trabajos futuros.....	88
Referencias.....	89
6. Anexos	91
6.1 Anexo 1: Curva de la bomba de referencia – Ficha técnica	91
6.2 Anexo 2: Diseño en Pipe Flow - Diagrama sistema hidráulico.....	91
6.3 Anexo 3: Ficha técnica del tanque de referencia.....	96
6.5 Anexo 4: Calculo de factor de seguridad del TK01	97
6.5 Anexo 5: Escala de % de llenado, para la simulación en Workbench.	98

Lista de Figuras

FIGURA 1 PLANTA DE FLUJO Y NIVEL DEL 2002 [1].	19
FIGURA 2 PLANTA DE FLUJO Y NIVEL ORIGINAL 2024.	23
FIGURA 3 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA PLANTA DE FLUJO Y NIVEL ACTUAL.	24
FIGURA 4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO.	37
FIGURA 5 PRIMER TRAMO TUBERÍA “TANQUE DE RESERVA – BOMBA CENTRIFUGA”.	41
FIGURA 6 SEGUNDO TRAMO TUBERÍA “BOMBA CENTRIFUGA – MANÓMETRO 1 – TUBERÍAS DE RETORNO TANQUE RESERVA”.	42
FIGURA 7 TERCER TRAMO TUBERÍA “BOMBA CENTRIFUGA – TANQUE DE CONTROL”.	43
FIGURA 8 CUARTO TRAMO TUBERÍA “TANQUE DE CONTROL – TANQUE DE RESERVA O DESAGÜE”.	43
FIGURA 9 CONFIGURACIÓN MATERIAL Y MEDIDAS SISTEMA DE TUBERÍA.	51
FIGURA 10 BANCO DE ACCESORIOS PARA TUBERÍAS DE ½”.	52
FIGURA 11 EJEMPLO DE ACCESORIOS TUBERÍA 14.	52
FIGURA 12 EJEMPLO TUBERÍA 8.	53
FIGURA 13 EJEMPLO DE ACCESORIOS TUBERÍA 8.	53
FIGURA 14 SISTEMA DE TUBERÍAS ENSAMBLADO.	54
FIGURA 15 RANGOS DE VELOCIDAD DEL FLUIDO.	55
FIGURA 16 TUBERÍAS REPRESENTADAS POR COLORES DE VELOCIDAD.	56
FIGURA 17 DATOS DE LA BOMBA ENTREGADO POR LA SIMULACIÓN.	57
FIGURA 18 DISEÑO P&ID.	60
FIGURA 19 LAZO ABIERTO.	61
FIGURA 20 LAZO CERRADO DEL SISTEMA.	61
FIGURA 21 HMI DE SIMULACIÓN.	66
FIGURA 22 GENERADOR DE CORRIENTE POCKETCAL.	67
FIGURA 23 CONEXIÓN DE LA RESISTENCIA GENÉRICA EN EL MÓDULO DEL MICRO PLC.	68
FIGURA 24 CONEXIÓN DE LA FUENTE DE PODER DEL MICRO PLC.	68
FIGURA 25 INTERFAZ HMI DEL SISTEMA DE CONTROL PID Y PARÁMETROS DE CONTROL.	71
FIGURA 26 TANQUE REFERENCIA.	72
FIGURA 27 ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO DEL TANQUE DE CONTROL.	73
FIGURA 28 SIMULACIÓN DE CONTROL DE LLENADO DEL TANQUE.	74
FIGURA 29 TANQUE DE RESERVA ORIGINAL.	75
FIGURA 30 TANQUE DE CONTROL 1 ORIGINAL.	76
FIGURA 31 TANQUE DE CONTROL 2 ORIGINAL.	76
FIGURA 32 LAZO CERRADO DEL SISTEMA DE SIMULACIÓN.	83

FIGURA 33 SIMULACIÓN DEL LAZO CERRADO DEL SISTEMA.	85
FIGURA 34 CURVA DE RENDIMIENTO DE LA BOMBA DE REFERENCIA.	91
FIGURA 35 PROPIEDADES DEL AGUA.	92
FIGURA 36 INFORMACIÓN DE LA BOMBA.	92
FIGURA 37 ANÁLISIS DE SISTEMA DE TUBERÍA.	92
FIGURA 38 ACCESORIOS POR TRAMO DE TUBERÍA.	93
FIGURA 39 ACCESORIOS POR TRAMO DE TUBERÍA.	94
FIGURA 40 INFORMACIÓN DE NODOS EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA.	94
FIGURA 41 INFORMACIÓN DE ENERGÍA.	95

Lista de tablas

TABLA I. COMPONENTES DE LA PLANTA DE FLUJO Y NIVEL ACTUAL.	20
TABLA II PLANTAS CON PRINCIPIOS SIMILARES EN USO DE LABORATORIOS.	25
TABLA III PLANTAS O MÁQUINAS CON PRINCIPIOS SIMILARES ENCONTRADAS EN LA INDUSTRIA. .	26
TABLA IV REGLAS EMPÍRICAS DE LOS EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR SOBRE LA VELOCIDAD Y LA ESTABILIDAD DEL LAZO CERRADO.	28
TABLA V ACCESORIOS DE PRIMER TRAMO	42
TABLA VI ACCESORIOS SEGUNDO TRAMO.	42
TABLA VII ACCESORIOS TERCER TRAMO.	43
TABLA VIII ACCESORIOS CUARTO TRAMO.	44
TABLA IX SENSORES Y ACTUADORES DEL SISTEMA.	62
TABLA X COMPONENTES ANALÓGICOS DEL SISTEMA.	63
TABLA XI COMPONENTES DIGITALES DEL SISTEMA.	64
TABLA XII PARÁMETROS SINTONIZADOS EMPÍRICAMENTE CON EL MÉTODO LAMBDA.	69
TABLA XIII ESTANDARIZACIONES DE PORCENTAJE DE NIVEL, SEGÚN LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE LA SIMULACIÓN PRÁCTICA.	69
TABLA XIV VALORES DE ESTABILIDAD POR PARÁMETRO.	74
TABLA XV COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.	77
TABLA XVI DATOS INICIALES DE LA DINÁMICA DEL PROCESO.	80
TABLA XVII PARÁMETROS DE CONTROL DEL MODELO DE PRIMER ORDEN.	82
TABLA XVIII COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL OBTENIDOS.	86

Resumen

En la ingeniería mecánica y electrónica, la dinámica de fluidos y el control de procesos son esenciales. Este proyecto aborda la falta de una planta de control en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, desarrollando una validación simulada, como propuesta a un sistema de control de nivel que cumple con los estándares de la industria, proporcionando un entorno de aprendizaje práctico y avanzado para los estudiantes.

El propósito del trabajo es superar las limitaciones actuales de recursos prácticos y facilitar la transición de la teoría a la práctica. Se realizaron simulaciones de índole académicos de pregrado, obteniendo resultados hidráulicos significativos: un caudal de flujo de $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$, presiones de succión y descarga de -0.0987 bar y 0.1695 bar respectivamente, y una cabeza de la bomba de 2.740 m . Los parámetros de control obtenidos para el modelo de primer orden fueron K_p : 1.44, T_i : 60 s, y T_d : 15 s.

Las conclusiones destacan que la implementación teórica de la planta tiene el potencial de mejorar la formación de los estudiantes, proporcionando un entorno seguro para experimentar y aprender. Esto enriquece el aprendizaje práctico y prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos reales en sus futuras carreras, otorgándoles una ventaja competitiva en el mercado laboral.

Abstract

In mechanical and electronic engineering, fluid dynamics and process control are essential. This project addresses the lack of a control plant at Pontificia Universidad Javeriana Cali by developing a simulated validation as a proposal for a level control system that meets industry standards, providing students with an advanced practical learning environment.

The purpose of the work is to overcome current practical resource limitations and facilitate the transition from theory to practice. Undergraduate academic simulations were performed, yielding significant hydraulic results: a flow rate of $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$, suction and discharge pressures of -0.0987 bar and 0.1695 bar respectively, and a pump head of 2.740 m . The control parameters obtained for the first-order model were K_p : 1.44, T_i : 60 s, and T_d : 15 s.

The conclusions highlight that the theoretical implementation of the plant has the potential to enhance student training by providing a safe environment for experimentation and learning. This enriches practical learning and prepares students to face real-world challenges in their future careers, giving them a competitive advantage in the job market.

Introducción

En el campo de la ingeniería mecánica y electrónica, la comprensión y manejo de los principios de dinámica de fluidos y control de procesos son esenciales. Este proyecto aborda la necesidad de una planta de control en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, tomando como referencia una planta de flujo y nivel original construida en 2002. Dado que la tecnología ha avanzado significativamente desde entonces, este proyecto busca validar un sistema de control de nivel simulado con especificaciones hidráulicas actualizadas [1].

El propósito es desarrollar una planta de flujo y nivel que cumpla con los estándares de seguridad y adaptabilidad, proporcionando un entorno de aprendizaje avanzado y dinámico para los estudiantes. Esto facilitará la transición de la teoría a la práctica, superando las limitaciones de los recursos prácticos actuales.

A diferencia de la planta de control original de 2002, este proyecto incorpora tecnología moderna y especificaciones hidráulicas avanzadas. Utilizando herramientas académicas usadas durante la carrera, donde se mejoran significativamente la precisión del control y la medición. Esto proporciona a los estudiantes una experiencia educativa más robusta y alineada con las prácticas industriales contemporáneas, reflejando los avances tecnológicos recientes y mejorando la capacidad de simulación y medición.

El documento está estructurado de la siguiente manera: se presenta primero el planteamiento del problema, seguido del estado del arte, el cumplimiento de los objetivos, la metodología empleada, los resultados obtenidos, y finalmente, las conclusiones.

1. Descripción del Problema

1.1 Problema de Investigación

En la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana, seccional Cali, se ha identificado una limitación significativa en su infraestructura educativa: la falta de una planta de flujo y nivel. Esta carencia es un obstáculo en el desarrollo de competencias prácticas para los estudiantes, especialmente en la comprensión y manipulación de procesos industriales relacionados con el control y medición de fluidos.

El propósito de este proyecto es validar un sistema de control de nivel utilizando laboratorios virtuales, tomando como referencia una planta original construida en 2002. La planta original sirvió como una base importante para la educación práctica, pero debido a los avances tecnológicos y las nuevas exigencias educativas, se ha quedado obsoleta en términos de especificaciones hidráulicas y capacidades de simulación. Este proyecto busca superar el estudio anterior con base a softwares académicos de simulación [1].

En el contexto de este proyecto, una validación educativa implica asegurar que el nuevo sistema de control de nivel, a través de laboratorios virtuales, cumple con los estándares pedagógicos modernos y proporciona un entorno de aprendizaje efectivo. Esto incluye la implementación de especificaciones hidráulicas para mejorar la precisión y el realismo de las simulaciones y experimentos. La validación educativa se centra en garantizar que los estudiantes puedan adquirir habilidades prácticas y teóricas en un entorno simulado que replica los desafíos de la industria real.

La integración de una planta de nivel virtual no solo elevará el nivel de competencia técnica de los estudiantes, sino que también impulsará la investigación y la innovación en el campo de la ingeniería de control. Esto proporcionará un entorno donde los estudiantes pueden realizar experimentos y simulaciones industriales, preparándolos mejor para sus futuras carreras en ingeniería y alineando a la universidad con mayores validaciones educativas en el ámbito laboral.

Con base a lo anterior, surge la pregunta: ¿Cómo mejorar el diseño de la planta de flujo y nivel actual, utilizando laboratorios virtuales, de forma que fomente el trabajo práctico en programas de pregrado y postgrado en la Pontificia Universidad Javeriana Cali?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Proponer el diseño mecánico y la simulación hidráulica de la planta de flujo y nivel, promoviendo el trabajo práctico en programas de ingeniería mecánica, civil y electrónica en pregrado y posgrado.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar los cálculos hidráulicos del sistema de la planta de flujo y nivel.
2. Diseñar un sistema de instrumentación básica de la planta.
3. Ejecutar el análisis estático de los tanques, bajo los criterios de diseño en la industria.
4. Evaluar el desempeño mediante softwares de simulación para el proceso completo de la planta.

1.3 Justificación del Problema

La justificación de este problema radica en la necesidad de mejorar la infraestructura educativa de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Pontificia Universidad Javeriana, seccional Cali, mediante la incorporación de laboratorios virtuales para la validación de sistemas de control de nivel. La ausencia de una planta de flujo y nivel limita significativamente el desarrollo de competencias prácticas en los estudiantes, esenciales para la comprensión y manipulación de procesos industriales relacionados con el control y medición de fluidos.

1.3.1 Importancia de la Validación Educativa con Laboratorios Virtuales

Los laboratorios virtuales representan una herramienta avanzada y accesible para la enseñanza de ingeniería, permitiendo a los estudiantes interactuar con simulaciones precisas de sistemas reales. Esta metodología no solo es económica y segura, sino que también ofrece la flexibilidad de replicar condiciones industriales diversas y experimentar sin las limitaciones físicas de un laboratorio

tradicional. La validación educativa a través de estos laboratorios asegura que los estudiantes adquieran habilidades prácticas y teóricas en un entorno controlado y realista.

1.3.2 Contexto Tecnológico y Educativo

Desde la implementación de la planta original en 2002, los avances tecnológicos han revolucionado las herramientas disponibles para la educación en ingeniería. Las nuevas tecnologías de simulación como Pipe Flow, SolidWorks Flow Simulator y LabVIEW permiten una modelización más precisa y una mejor comprensión de los sistemas de control de nivel. Incorporar estas tecnologías en la educación permitirá a los estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana Cali acceder a una formación más completa y actualizada, alineada con las prácticas industriales contemporáneas.

1.3.3 Beneficios y Oportunidades

La integración de laboratorios virtuales para la validación de sistemas de control de nivel en la universidad proporcionará múltiples beneficios:

- **Mejora en la Calidad Educativa:** Ofrecerá a los estudiantes una plataforma robusta para entender los principios de la mecánica de fluidos y el control de procesos, enriqueciendo su experiencia de aprendizaje.
- **Desarrollo de Competencias Prácticas:** Permitirá a los estudiantes realizar experimentos y simulaciones complejas, preparándolos mejor para enfrentar desafíos reales en sus futuras carreras profesionales.
- **Innovación e Investigación:** Impulsará la capacidad de investigación e innovación en el campo de la ingeniería de control, promoviendo el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos de enseñanza.

La implementación de estos laboratorios no solo eleva el nivel de competencia técnica de los estudiantes, sino que también fortalece la posición de la universidad como líder en educación avanzada en ingeniería, alineándola con las mejores prácticas y estándares internacionales.

1.4 Restricciones de diseño.

Normativas y estándares: El diseño debe cumplir con estándares industriales como:

- ISA 5.1 para la notación y especificación de instrumentos y sistemas de control [2].
- API 520/521 y API 570 para dispositivos de alivio de presión y sistemas de tuberías [3].
- ASME BPVC: La norma ("Boiler and Pressure Vessel Code") establece los requisitos para el diseño, fabricación y mantenimiento de calderas y recipientes a presión, asegurando la seguridad y eficiencia en el manejo de fluidos a presión en la planta de control de nivel [4].
- ASME B31.3: La norma ("Process Piping") proporciona directrices para el diseño, materiales, fabricación, montaje, inspección y pruebas de sistemas de tuberías de proceso, garantizando la integridad y seguridad en la distribución de fluidos dentro del sistema de control de nivel [5].
- ISO 527 para el estándar de resistencia a la tracción en modelos de tanques de pared delgada [6].
- SP001 de STI/SPFA: Validación de un margen de seguridad adecuado para garantizar la durabilidad y fiabilidad a largo plazo del tanque de control [7].

Modelo dinámico del proceso: El diseño debe contar con un modelo matemático que interprete la dinámica del proceso del sistema PID creado.

Adaptabilidad educativa: El diseño es flexible a la utilidad en carreras de ingeniería, estudiando el comportamiento de la dinámica de fluidos y control de procesos. Además, debe ser de fácil uso para profesores, laboratoristas y monitores que instruyan al estudiante, facilitando la comprensión y el aprendizaje de conceptos clave en diferentes etapas durante la formación de carreras como ingeniería

mecánica, ingeniería civil e ingeniería electrónica donde se verán de una manera útil y de aprendizaje.

Geometría de tanques: Geometría del tanque de control y de reserva debe ser cilíndrica, ya que ofrece una mejor distribución de presión, facilitando estudios de hidrodinámica [8]. Además, su diseño simplifica la limpieza y mantenimiento, aspectos cruciales para preservar la calidad del agua en entornos educativos.

1.5 Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

Análisis Hidráulico del Sistema:

- **Entrega:** Esquema de desplazamiento, así como un análisis hidráulico completo del mismo.
- **Evidencia:** Presiones, velocidades, pérdida por cargas, pérdidas por fricción y accesorios del esquema de desplazamiento hidráulico [Anexo 2].

Instrumentación Básica de la Planta:

- **Entrega:** Análisis completo del sistema utilizando P&ID (Piping and Instrumentation Diagram). Además del análisis completo modelo dinámico del proceso y simulación en Workbench.
- **Evidencia:** Reportes detallados del modelo dinámico y resultados de simulación que incluyen gráficos y análisis de comportamiento del sistema en Workbench.

Validación del Sistema de Desplazamiento en el Tanque de Control:

- **Entrega:** Evaluación del comportamiento del fluido en el tanque de control.
- **Evidencia:** Reportes de validación que incluyan coeficientes de uniformidad y simulaciones que muestren el desplazamiento del fluido dentro del tanque.

Validación Estructural de los Tanques del Sistema:

- **Entrega:** Análisis estructural de los tanques para asegurar su integridad bajo las condiciones operativas.

- **Evidencia:** Resultados de simulaciones estructurales que incluyan esfuerzos y factores de seguridad, documentados con gráficos y conclusiones detalladas.

1.5.2 Limitaciones

1. Dependencia de Tecnologías Virtuales:

La implementación del proyecto se basa en la utilización de laboratorios virtuales, lo que puede limitar la experiencia práctica directa con equipos físicos. Aunque las simulaciones ofrecen un entorno seguro y controlado, la falta de interacción con hardware real podría restringir el desarrollo de ciertas habilidades táctiles y operativas.

2. Requerimientos de Infraestructura y Recursos:

La integración de herramientas tecnológicas avanzadas requiere de infraestructura adecuada y recursos financieros. La adquisición de licencias de software, equipos de cómputo de alto rendimiento y la capacitación de personal puede representar un desafío significativo en términos de costos y logística.

3. Actualización Continua de Tecnología:

Las tecnologías de simulación y software evolucionan rápidamente, lo que implica la necesidad de actualizaciones constantes para mantener la relevancia y efectividad del sistema de control de nivel simulado. Esto puede representar un desafío adicional en términos de gestión y mantenimiento del proyecto a largo plazo.

2. Marco de Referencia

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Definición de planta de control de nivel

Principalmente es un sistema diseñado para mantener un nivel de líquido específico dentro de un tanque o contenedor, esencial para aplicaciones industriales como la producción de energía, tratamiento de aguas y manufactura. Este sistema incluye componentes como sondas de conductividad y capacitancia, que detectan el nivel del líquido y envían señales a controladores electrónicos. Los controladores ajustan las acciones de elementos de control finales, como válvulas y bombas, para mantener el nivel del líquido dentro de los límites deseados. Además, las alarmas de alto y bajo nivel aseguran la operación segura al advertir sobre niveles peligrosos. Estos sistemas son fundamentales para asegurar el funcionamiento eficiente y seguro de los procesos industriales, optimizando el uso de recursos y minimizando el riesgo de fallos operativos [9].





Figura 1 Planta de Flujo y nivel del 2002 [1].

2.1.2 Elementos de la planta de flujo y nivel.

En la siguiente Tabla I se muestran los componentes de instrumentación de la planta de flujo y nivel de la PUJ Cali original del 2002.

Tabla I. Componentes de la planta de flujo y nivel actual.

Piezas e instrumentación		Descripción
Válvulas de bola.		Es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado.
Válvula de asiento.		En estas válvulas, el disco o el pistón es el que se encarga de abrir o cerrar el paso de los fluidos.
Válvula de alivio.		Su principal propósito es liberar la presión acumulada cuando un fluido supera un nivel preestablecido.
Sensores de caudal.		Son dispositivos que permiten supervisar el comportamiento, volumen y velocidad de agua que atraviesa una superficie o tubería en un tiempo específico.
Depósitos o Tanques Pequeños		Plastank TC 60 [Anexo 3]
Bomba centrífuga [10]		Electrobomba centrífuga, monofásica.
Flujómetro		Es un instrumento que se usa para medir el caudal lineal, no lineal, de masa o volumétrico de un líquido o gas.
Manómetro		Instrumentos que miden la presión del fluido en un punto específico de la planta.

Piezas e instrumentación		Descripción
Electrovál- vula sole- noide.		Válvulas solenoides proporcionales servoaccionadas de 2 vías Tipo EV260B [Anexo A]
Transmisor de nivel		Instrumento de lectura análoga de llenado del sistema de control.

2.1.3 Clasificación de plantas de flujo y nivel

En la industria petroquímica, las plantas de flujo y nivel son esenciales para garantizar la correcta distribución y mezcla de los diferentes componentes que conforman los combustibles y otros derivados del petróleo. Estas plantas permiten que los procesos de refinación y mezcla se realicen de manera eficiente, garantizando la calidad del producto final. Además, el control preciso de los fluidos en esta industria es crucial para evitar accidentes y derrames que pueden tener graves consecuencias ambientales y económicas [11].

En la industria alimentaria, las plantas de flujo y nivel desempeñan un papel crucial en la producción y procesamiento de alimentos y bebidas. Estas plantas garantizan que los ingredientes se mezclen en las proporciones adecuadas y que los productos se procesen a las temperaturas y presiones correctas. Esto es esencial para mantener la calidad y seguridad de los alimentos, evitando la contaminación y garantizando que los productos cumplan con los estándares de salud y nutrición. Además, en la producción de bebidas, como cervezas y refrescos, el control preciso del flujo de líquidos es esencial para garantizar el sabor y la carbonatación adecuados [12].

En la industria farmacéutica, las plantas de flujo y nivel son fundamentales para la producción de medicamentos y otros productos farmacéuticos. Estas plantas garantizan que los ingredientes activos se mezclen en las proporciones correctas y que los procesos de producción se realicen bajo condiciones estrictamente controladas. Esto es esencial para garantizar la eficacia y seguridad de los medicamentos. Según un informe de la Federación Internacional de Fabricantes y Asociaciones Farmacéuticas (IFPMA), la industria biofarmacéutica ha liderado la búsqueda de tratamientos y vacunas,

especialmente en tiempos de pandemia, y ha hecho grandes esfuerzos para innovar y mejorar la salud mundial [13].

2.1.4 Normativas y estándares mecánicos en plantas de flujo y nivel

Al abordar la mejora de diseño de una planta de flujo y nivel para un entorno universitario, es esencial considerar las normativas y estándares mecánicos que guían su construcción y operación. Sin embargo, dada la naturaleza específica de las aplicaciones universitarias, es posible adaptar estas normativas para satisfacer las necesidades educativas y de investigación sin comprometer la funcionalidad básica [14].

2.2 Estado del arte

2.2.1 Planta de flujo y nivel actual

La validación de diseño para la planta se basa en el modelo de una planta establecida anteriormente y construida en el año 2002. A partir de este sistema se tendrán algunas partes que pueden reutilizarse para la nueva planta con la que se podrá ahorrar dinero y tener un precedente a esta reciente planta.

En la planta actual, dejando los componentes electrónicos y de control, se encuentran unas 10 válvulas, que regulan la entrada de fluidos por el sistema; y un tanque de reserva con el que garantiza un suministro estable y controlado del fluido, lo que contribuye a la realización exitosa del experimento. Actualmente hay dos tanques, elementos fundamentales para el almacenamiento de líquidos durante el proceso de laboratorio, también se tiene la regulación del flujo que pasa por el sistema y el control de nivel con el cual se ajusta la entrada y salida del líquido para mantener un nivel constante, y por último tenemos la bomba, la cual es la parte fundamental de la planta; ésta nos proporciona una circulación de agua constante por la planta. En la Figura 2 se encuentran las partes principales que componen la actual planta.



Figura 2 Planta de flujo y nivel original 2024.

De las partes mencionadas anteriormente, se podrá reutilizar tanto la bomba, las válvulas y el manómetro, los tanques y tuberías se encuentran en un pésimo estado, por lo que no se usarán en el nuevo diseño. Ahora, la configuración de instrumentación y tuberías actuales se interpretaría mediante un diagrama de esquemático de la planta como lo muestra la figura 3, sin embargo, no se podrá realizar a primera instancia porque el montaje en si no está completo y en mal estado, como lo muestra la figura 2. Mas adelante en los resultados del proyecto se desarrollará un diagrama esquemático como propuesta de mejora y un P&ID; si no, no se tendrá un diseño conceptual de la planta. De momento se realizó un diagrama de flujo de la planta de flujo y nivel actual, tal como lo muestra la figura 3. Aunque es muy conceptual, es lo máximo que podrá interpretar debido al estado de la planta.

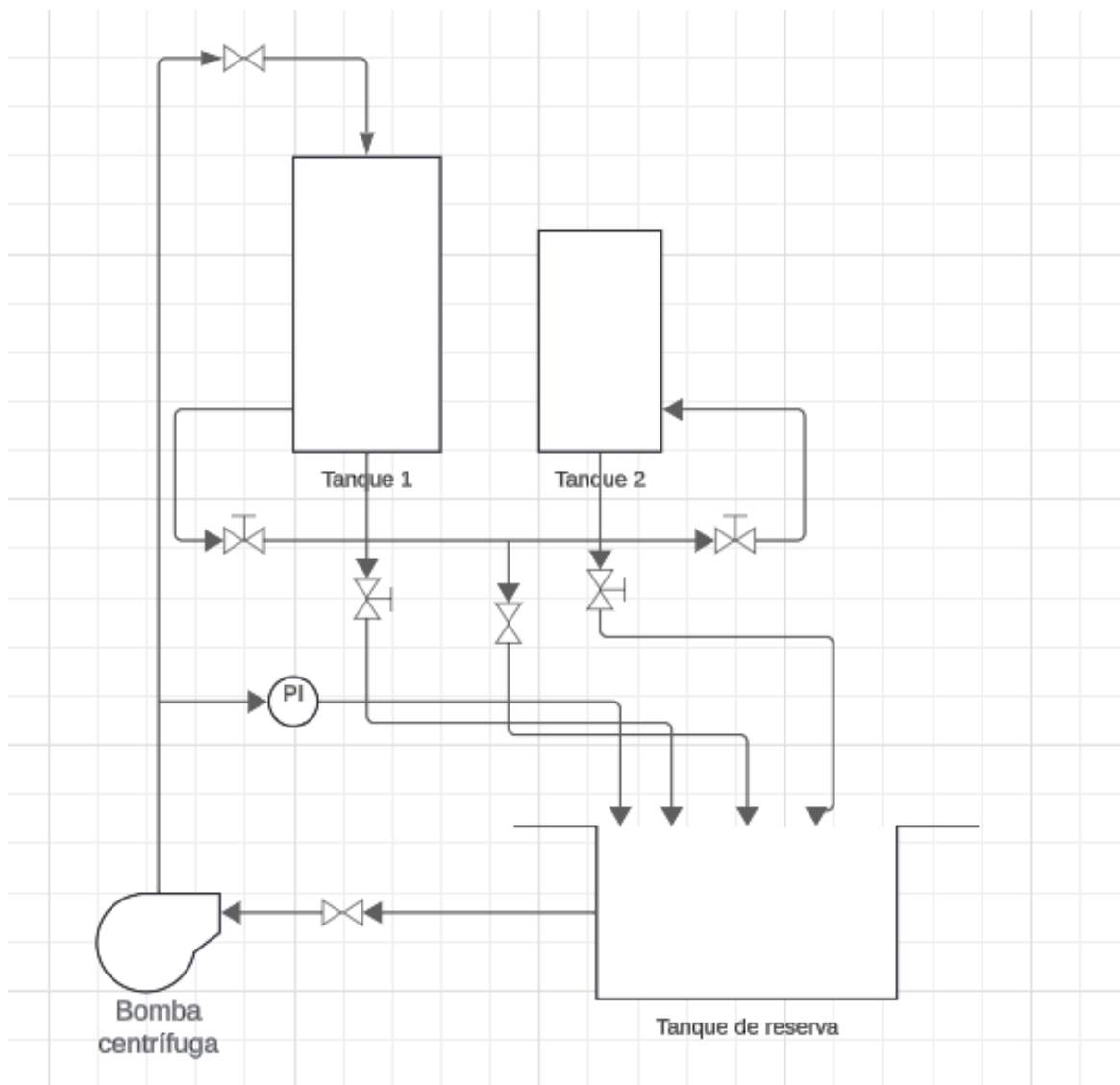




Figura 3 Diagrama esquemático de la planta de flujo y nivel actual.

2.2.2 Plantas y desarrollos actuales

En la Tabla II se mencionan los resultados de la búsqueda de diferentes plantas con el mismo principio de funcionamiento a la de flujo y nivel en ámbitos de educación superior y utilización en laboratorios, además en la tabla III se presentan algunas máquinas o plantas que tienen su mismo principio, pero aplicado a la industria. En estas dos tablas se observan plantas con principios similares en uso de laboratorios y en la industria, especificaciones que van desde el fabricante, hasta los tanques, bombas y otras especificaciones.

Tabla II Plantas con principios similares en uso de laboratorios.

Producto		Especificaciones del producto
<p>Equipo de Regulación de Flujo, Nivel, Presión y Temperatura para el Control de Procesos, “FLPTU” [15].</p>		<p>Fabricante: Edibon.</p> <p>Tanques de almacenamiento: Dos tanques, el mayor con capacidad de 140 l y el superior con capacidad de 5 l.</p> <p>Bombas: Una bomba centrífuga de 375 W y una bomba de circulación de 103 W.</p> <p>Otras especificaciones: Circuito de agua fría que incluye sensores de diferentes tipos para dar a los estudiantes una comprensión completa en la teoría.</p>
<p>Equipo para estudio de control de presión, nivel, temperatura y flujo DC-MV-200/EL [16].</p>		<p>Fabricante: Generatoris S.A. de C.V.</p> <p>Tanques de almacenamiento: Dos tanques de alimentación y recirculación de agua al sistema, fabricados en material transparente con capacidad de 20 litros.</p> <p>Bombas: Bomba centrífuga para alimentación de agua en circuito cerrado de 0,5 HP de potencia.</p> <p>Otras especificaciones: Unidad completamente instrumentada a escala de laboratorio, montada sobre una estructura en aluminio reforzado tipo industrial, compuesta de una unidad de proceso y un gabinete de control.</p>




Producto		Especificaciones del producto
Unidad de regulación de caudal, de nivel, de presión y de temperatura MPU/EV [17].		<p>Fabricante: ElettronicaVeneta.</p> <p>Tanques de almacenamiento: Tanque de acumulación del agua, de acero inoxidable AISI 304, capacidad de 20 l y tanque para el control del nivel con válvula de seguridad, de acero inoxidable AISI 304 con capacidad de 18 l.</p> <p>Bombas: Dos bombas centrifugas de circulación con un caudal de cuatro metros cúbicos sobre hora, cuerpo y rotor de acero inoxidable AISI 304.</p> <p>Otras especificaciones: Unidad proyectada para efectuar la regulación automática simultanea del caudal, nivel, temperatura y presión utilizando un controlador PID multibucle.</p>

Tabla III Plantas o máquinas con principios similares encontradas en la industria.

Producto		Especificaciones del producto
Máquina para mezcla de combustibles USB-1 [18].		<p>Fabricante: GlobeCore.</p> <p>Tanques de almacenamiento: Contiene un tanque con capacidad de 20 l.</p> <p>Bombas: Tienen una bomba de desplazamiento positivo (PD) y una bomba centrífuga.</p> <p>Otras especificaciones: Las plantas de mezcla se utilizan en la producción de cualquier combustible, todo esto bajo los requerimientos del cliente.</p>

Producto		Especificaciones del producto
Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas compacta Sbr [19].		<p>Fabricante: Synertech water technologies.</p> <p>Tanques de almacenamiento: Tanque de almacenamiento de aproximadamente 1000 metros cúbicos, esto dependiendo de la demanda que se solicite.</p> <p>Bombas: Contiene una bomba de elevación con el fin de elevar las aguas hasta donde se llevará a cabo el tratamiento, además de una bomba de recirculación para devolver el afluente a etapas anteriores del proceso.</p> <p>Otras especificaciones: Esta es una planta compacta con menor consumo energético, un mantenimiento sencillo, fácil transporte, realizada de acero inoxidable 304 o de acero al carbón.</p>

2.2.3 Estudios de referencia

2.2.3.1 Diseño e implementación de un módulo didáctico para el control de flujo y nivel (2002)

Este estudio describe el desarrollo de una planta de control de flujo y nivel diseñada en 2002. La planta fue construida para la Pontificia Universidad Javeriana Cali y consistía en tres tanques cúbicos abiertos a la atmósfera. La instrumentación incluía sensores de presión diferencial para la medición de nivel y sensores de turbina para el flujo. El sistema empleaba controladores PID tanto análogos como digitales para regular el flujo y el nivel de los tanques. Este estudio es crucial para el proyecto actual porque proporciona una base sólida y experiencia previa en el diseño y operación de una planta de control de nivel, destacando la importancia de la integración de instrumentación y control en la educación de ingeniería [1].

2.2.3.2 Herramienta de sintonización de controladores PI y PID basada en el método lambda

El documento “PI and PID Controller Tuning Tool Based on the Lambda Method” introduce el método Lambda, una técnica estandarizada para la sintonización de controladores PI y PID en sistemas de control de nivel. El método Lambda facilita la rápida sintonización y asegura un desempeño

consistente del sistema al definir una constante de tiempo de respuesta deseada. Este método es particularmente útil en la validación de sistemas de control de nivel, permitiendo la optimización de los parámetros del controlador para mantener el nivel del líquido dentro de los límites deseados [20].

Tabla IV Reglas empíricas de los efectos de los parámetros del controlador sobre la velocidad y la estabilidad del lazo cerrado

Parámetros de control	Velocidad	Estabilidad
K aumenta	aumenta	decrece
Ti aumenta	decrece	aumenta
Td aumenta	aumenta	aumenta

Este enfoque es relevante para el proyecto porque proporciona una metodología estructurada para ajustar los parámetros del controlador, lo que puede mejorar la estabilidad y precisión del sistema de control propuesto.

2.2.3.3 Sistema No Lineal de Tanques Acoplados; Modelado y Control de Nivel usando Técnicas PID y Lógica Difusa

El estudio "Coupled Tank Non-linear System; Modeling and Level Control using PID and Fuzzy Logic Techniques" investiga el control de nivel en un sistema de tanques acoplados, una configuración común en la industria. El estudio presenta un modelo matemático del sistema y realiza simulaciones utilizando Matlab. Se comparan dos técnicas de control: el PID convencional y el controlador de lógica difusa (FLC). Los resultados muestran que el FLC reduce significativamente el sobre impulso y el error en estado estacionario en comparación con el PID, aunque tiene dificultades para eliminar perturbaciones. Este estudio es relevante para el proyecto actual porque ofrece perspectivas avanzadas sobre el modelado y control de sistemas no lineales, proporcionando técnicas que podrían adaptarse para mejorar el diseño y control del sistema de tanques de nivel [21].

3. Metodología

3.1 Realizar los cálculos hidráulicos del sistema de la planta.

3.1.1 Diagrama esquemático del sistema.

Para alcanzar una comprensión precisa del sistema de tuberías, es esencial desarrollar un diagrama esquemático detallado. Este diagrama no solo proporciona una representación visual clara de los componentes y sus interconexiones, sino que también facilita la identificación de posibles puntos de mejora.

El proceso de creación del diagrama esquemático incluye los siguientes pasos:

3.1.1.1 Diseño del esquema inicial.

- Utilizar software de diagramación (Lucid chart) para crear el esquema preliminar.
- Representar cada componente con su respectivo símbolo (según la norma API 5.1), y conectar cada elemento según como se especifica en el sistema [2].

3.1.1.2 Identificación de rutas de flujo.

- Determinar las rutas de flujo principales y secundarias dentro del sistema de tuberías.
- Asegurar que las conexiones y direcciones de flujo se encuentren indicadas en el diagrama.

3.1.1.3 Asignación de descripciones.

Proporcionar información como diámetros, materiales y funciones específicas de cada componente.

3.1.2 Identificar fuentes de entrada y salida de flujo.

Para realizar los cálculos hidráulicos del sistema, se deben identificar de manera precisa las fuentes de entrada y salida de flujo. Este paso se necesita para asegurar que todas las variables y condiciones del sistema estén definidas y comprendidas, lo que permitirá llevar a cabo un análisis más preciso. La identificación de estas fuentes incluye los siguientes aspectos:

3.1.2.1 Inspección del sistema.

- Mediante la inspección al esquema realizado anteriormente, identificar las fuentes de entrada y salida de flujo.
- Documentar las características de cada fuente, que incluya la ubicación, diámetro, tipo de conexión y condiciones al operar.

3.1.3 Identificación y cuantificación de accesorios en cada tramo de tubería.

Para poder realizar los cálculos hidráulicos del sistema de manera precisa, es fundamental identificar y cuantificar todos los accesorios en cada tramo de tubería. Estos accesorios, como codos, válvulas y tees, tienen un impacto directo en el comportamiento del sistema. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

3.1.3.1 Cuantificación de accesorios.

- Contabilizar todos los accesorios identificados en cada tramo de tubería.
- Crear un inventario que incluya el número total de accesorios y sus especificaciones técnicas.

3.1.3.2 Evaluación de importancia en el sistema.

- Determinar como la presencia de estos accesorios afecta el flujo hidráulico en el sistema de tuberías.

- Utilizar esta información para ajustar los cálculos hidráulicos asegurando una mayor precisión.

3.1.4 Selección de ecuaciones a aplicar.

Para poder realizar los cálculos hidráulicos del sistema de manera precisa, es crucial seleccionar adecuadamente las ecuaciones que se aplicarán. La elección correcta de estas ecuaciones garantiza que los resultados obtenidos sean precisos. Se describen los pasos a seguir en este proceso de selección:

3.1.4.1 Identificación de ecuaciones relevantes.

Seleccionar las ecuaciones que se aplicarán a los cálculos hidráulicos, como la ecuación de continuidad, ecuaciones de caudales, ecuaciones de pérdidas por accesorios, ecuaciones de Bernoulli entre otras.

3.1.4.2 Validación de las ecuaciones seleccionadas.

- Verificar que las ecuaciones son propias para el sistema y materiales empleados.
- Asegurarse que las ecuaciones sean compatibles con los datos que se tengan y las especificaciones del sistema.

3.1.5 Elección del simulador y desarrollo de simulaciones.

Para llevar a cabo los cálculos hidráulicos del sistema, es importante elegir el simulador adecuado y desarrollar simulaciones precisas. Este proceso nos sirve para obtener resultados confiables que permitan optimizar el diseño y funcionamiento del sistema.

3.1.5.1 Selección del simulador.

Analizar diferentes opciones de simuladores disponibles, considerando cosas como la precisión, facilidad de uso y compatibilidad con los datos que tenemos. Además de seleccionar correctamente el simulador que mejor se adapte al sistema que tenemos.

3.1.5.2 Desarrollo de simulaciones.

Configurar y ejecutar las simulaciones en el simulador seleccionado. Incluir parámetros relevantes del sistema y definir escenarios de simulación para analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones. Analizar los resultados obtenidos para identificar posibles problemas y optimizar el diseño.

3.2 Implementar un sistema de instrumentación básica de la planta.

3.2.1 Diseño del P&ID y Selección de Instrumentos

A modo de continuar con el sistema que se plantea para la planta, se desarrolló el proceso de elección sugerida, buscando implementar parte de instrumentación en la planta de nivel, validando un diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) de la planta. Este diagrama identifica todos los componentes necesarios para el control del nivel y explicará el sistema planteado.

El proceso metodológico incluye los siguientes pasos:

1. Desarrollo del P&ID:

- Crear un diagrama detallado que represente todas las conexiones entre los componentes de instrumentación y las tuberías, asegurando que cada instrumento esté correctamente ubicado para un funcionamiento óptimo.
- Incluir todas las tuberías, válvulas, bombas y conexiones eléctricas necesarias para el sistema de control de nivel.

2. Componentes y ubicación del sistema P&ID:

- Identificar los sensores y actuadores necesarios para el control del nivel y flujo en la planta, asegurando que sean adecuados para su futura implementación.
- Explicar el sistema planteado, describiendo cómo cada componente contribuirá al control y monitoreo del nivel y flujo del fluido en la planta.

3.2.2 Simulación practica de componentes principales del sistema PID

La instrumentación de la planta será simulada en el entorno de Workbench para evaluar su funcionalidad y eficacia antes de cualquier implementación física. Los siguientes pasos fueron:

1. Configuración del PLC y HMI: Se configura en Workbench para recibir y procesar las señales de entrada simuladas de los sensores de nivel y caudal, y para controlar los actuadores virtuales.
2. Simulación de Señales de Sensores: Utilizando el generador de corriente (4-20 mA), se simula las señales de los sensores de nivel y caudal. Estas señales fueron enviadas al PLC, que procesa la información y envía comandos al HMI.
3. Proceso de Escalado: Las señales analógicas de 4-20 mA son escaladas en valores cuantitativos utilizables por el PLC y el HMI. Este proceso asegura que los datos presentados en la interfaz sean precisos y reflejen el estado simulado de la planta.

3.2.3 Conexión y Control en el Entorno de Simulación

1. Conexión: En el entorno de Workbench, se establecieron las conexiones virtuales entre el PLC, el HMI y los sensores/actuadores simulados. Esto incluye la configuración de rutas de señal y la verificación de la comunicación entre los componentes.
2. Programación PLC: Se programa el PLC en Workbench para gestionar las señales de los sensores y controlar los actuadores en función de los parámetros establecidos. Se utiliza un bloque funcional PID para ajustar el control del nivel y se buscara un sistema de sintonía de los parámetros de estabilidad del error.
3. Diseño de la Interfaz HMI: Se diseño la interfaz del HMI en Workbench para mostrar los datos de los sensores y permitir el control manual y automático de la planta. La interfaz incluyo una visualización gráfica de los niveles de fluido, caudal y estado de los actuadores.

3.2.4 Pruebas de Simulación

Se realizaron pruebas en el entorno de Workbench para la verificación de operaciones del sistema de instrumentación simulado. Las pruebas incluidas fueron:

Verificación de Señal Simulada: Se asegura que los sensores se lean correctamente y que las salidas del PLC controlen adecuadamente los actuadores simulados.

3.3 Análisis de Esfuerzos y Desplazamiento del tanque de control

3.3.1 Evaluación estructural.

- Se realiza los cálculos de esfuerzos tangenciales y axiales utilizando fórmulas para paredes delgadas [8].
- Se analiza los desplazamientos en diferentes partes del tanque, con especial atención a uniones soldadas y esquinas.
- Se visualiza los resultados mediante gráficos de distribución de esfuerzos y deformaciones para identificar zonas críticas y evaluar la integridad estructural del tanque.

Se lleva a cabo un análisis estructural detallado de los tanques que serán incorporados en la planta, ya que los actuales no cumplen con las restricciones del proyecto. El análisis incluye la evaluación de la integridad física y la resistencia de los materiales utilizados, así como la revisión de los diseños estructurales para asegurar que cumplan con los estándares industriales. Se utiliza técnicas de análisis no destructivo (Inspección manual y visual) para evaluar el estado interno de los tanques sin necesidad de desmantelarlos.

Dentro de los cálculos estructurales del tanque de control, se espera plantear el factor de seguridad del tanque de control y así asegurar la validación estructural del mismo, bajo un entorno máximo de funcionamiento de la planta.

3.3.2 Análisis de desplazamiento

El software de Solidworks Flow Simulator ayuda a estabilizar el sistema interno del tanque de control, según las entradas y salidas de este. La estabilización se logra iterando en múltiples oportunidades para la obtención del coeficiente de uniformidad del tanque TK02.

3.3.3 Análisis de los resultados

Con base en los resultados de la simulación hidráulica (flujo de entrada y de salida), se logra la estabilidad de las metas de la simulación:

- Presión promedio
- Velocidad promedio
- Coeficiente de uniformidad
- Flujo de salida

3.4 Evaluar el desempeño mediante softwares de simulación para el proceso completo de la planta.

3.4.1 Definición de los parámetros del sistema

- **Identificación de Variables:** Se determina las variables críticas del sistema, como nivel de líquido, flujo de entrada y salida, presión, y capacidad del tanque.
- **Parámetros Físicos:** Se establece los parámetros físicos del sistema, como dimensiones del tanque, características de la válvula proporcional, y propiedades del fluido (densidad, viscosidad).
- **Condiciones Iniciales:** Se define las condiciones iniciales del sistema, incluyendo nivel inicial del líquido y estado de las válvulas.

3.4.2 Desarrollo del modelo matemático

- **Ecuaciones de Balance de Masa:** Se formula las ecuaciones de balance de masa para el tanque, que relacionan el flujo de entrada, flujo de salida y el cambio en el nivel del líquido.
- **Función de Transferencia:** Se deriva la función de transferencia del sistema, que relaciona la salida (nivel del líquido) con la entrada (corriente de la válvula proporcional).

3.4.3 Implementación del modelo en herramientas de simulación

- **Software de Simulación:** Se utiliza el software de simulación como Matlab para implementar el modelo matemático. Ingresar los parámetros del sistema y las ecuaciones de balance.
- **Configuración de la Simulación:** Se configura el entorno de simulación con los tiempos de simulación, pasos de tiempo, y condiciones de frontera.

3.4.4 Validación del desempeño simulado del sistema de lazo cerrado

- Descripción del modelo de lazo cerrado (Diagrama de bloques).
- Configuración de parámetros de los bloques funcionales
- Validación de resultados y desempeño de la simulación del lazo cerrado del sistema.

4. Resultados del Proyecto

4.1 Análisis de Tuberías en Pipe Flow Expert.

4.1.1 Creación de diagrama esquemático.

Para alcanzar una comprensión precisa del sistema de tuberías y sus componentes, es esencial desarrollar un diagrama esquemático detallado. El cual nos proporcionará una representación visual clara de los componentes y sus interconexiones, además nos facilita la identificación de posibles puntos de mejora y optimización del diseño.

4.1.1.1 Desarrollo del esquema inicial.

El diagrama esquemático que se muestra en la figura 4 proporciona una representación visual, clara y precisa de los componentes del sistema y sus interconexiones, facilitando la comprensión del flujo.

El uso de herramientas de diagramación es importante para el diseño de sistemas, ya que permite una visualización detallada y una fácil modificación del diseño [22].

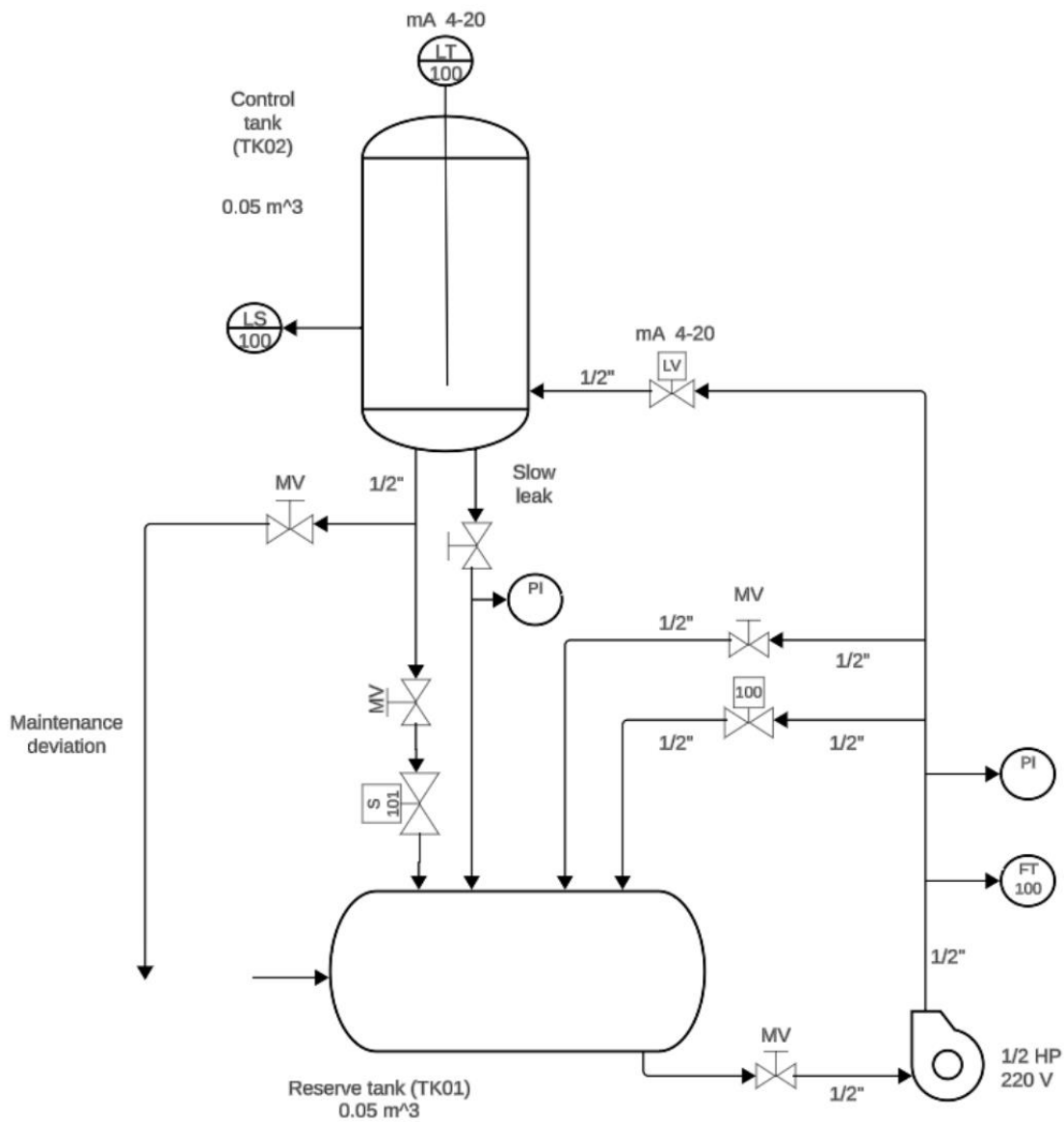


Figura 4 Diagrama esquemático.

El diagrama esquemático del sistema de tuberías incluye los siguientes componentes principales:

4.1.1.1.1 Tanque de control (TK02 CONTROL)

- Equipado con un transmisor de nivel (LT01) para monitorear el nivel del fluido dentro del tanque. Este transmisor de nivel nos será fundamental para garantizar el correcto funcionamiento de sistemas de almacenamiento y transporte de fluidos [23].
- El flujo del tanque de control es regulado por una válvula manual (MV) y una válvula de control de nivel (LV). Las válvulas de control de nivel son esenciales para aplicaciones donde se requiere una rápida respuesta y precisión en el control del flujo [24].

4.1.1.1.2 Tanque de reserva (TK01 RESERVA)

El tanque de reserva recibe fluido desde el tanque de control mediante una válvula manual (MV) y una válvula solenoide (S) la cual se abre a partir de ciertas condiciones de control. También recibe fluido del mismo tanque de control por caída libre, medida por un manómetro instalado a lo largo de la conexión y con el objetivo de tener un desfogue para la circulación de llenado en el sistema, las últimas dos conexiones que recibe es por una tubería con una válvula manual de tipo bola que actúa como recirculación y otra con una válvula solenoide que se abre con condiciones de control a través del PLC.

La válvula solenoide (S) está instalada para proteger contra sobrepresión. Las válvulas de seguridad son componentes críticos en sistemas de tuberías para evitar daños por sobrepresión y asegurar la integridad del sistema [25]. Finalmente, el tanque tiene otra abertura que sirve de entrada de líquido del exterior mediante una manguera.

4.1.1.1.3 Válvulas y sensores

- Las válvulas manuales (MV) controlan el flujo en varios puntos del sistema.
- Las válvulas de control (LV) ayudan a regular el flujo y la presión en ciertos puntos del sistema mediante condiciones de control.
- Los sensores de presión o manómetros (PI), toman la presión en diferentes puntos del sistema, el uso de estos manómetros ayuda a tener una idea de la presión que pasa por las tuberías además de ayudar a detectar anomalías en el sistema [26].

4.1.1.1.4 Bomba Centrífuga

La bomba está ubicada en la línea de salida del tanque de reserva (TK01) con el objetivo de impulsar el fluido a lo largo de la tubería. Esta operación es monitoreada por un manómetro a la salida de la bomba y otro en la tubería de caída libre del tanque de control hacia el tanque de reserva, el objetivo de estos manómetros es establecer los límites de presión para su buen funcionamiento, las bombas y los manómetros son importantes para mantener un flujo adecuado y prevenir fallos a lo largo del sistema [27].

Para realizar la selección de la bomba se contaba con un precedente de una bomba que se encontraba en la planta de flujo y nivel antigua, además al realizar la simulación el programa nos arrojó la información de que la bomba seleccionada por medio de su caudal máximo entregado, la velocidad, voltaje y potencia era la adecuada, el NPSH requerido por la bomba también se suplía por medio del NPSH dado por el sistema, así evitando futuros problemas de cavitación, esta bomba antigua contaba con las siguientes especificaciones técnicas:

- 0.4 HP
- 120 V
- 3300 rpm
- 30 l/min

Una vez ya tenemos los datos de la bomba anterior, buscamos una bomba con características y especificaciones técnicas similares que nos aseguren el correcto funcionamiento y buena implementación en la planta.

Se escogió la bomba centrífuga monofásica Pretul ½ hp la cual tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- 0.5 hp
- 127 V
- 3450 rpm
- 30 l/min

La bomba cuenta con las mismas especificaciones técnicas, lo cual nos asegura un funcionamiento de la planta, respecto a la curva de rendimiento de esta bomba se puede observar que la zona de uso recomendado se encuentra entre 0-5 m de altura y 10-20 l/min para que funcione de manera correcta [Anexo 1].

4.1.1.2 Conexiones y flujo.

Las líneas y flechas en el diagrama indican las rutas de flujo del fluido a lo largo del sistema, las conexiones entre la instrumentación se encuentran claramente representadas para mostrar cómo se integran en el sistema. Además, las flechas indican la dirección del flujo asegurando la dirección de movimiento del fluido del tanque de reserva hacia el tanque de control a través de la bomba así asegurando un proceso hidráulico efectivo.

4.1.2 Fuentes de entrada y salida de flujo.

Para realizar un análisis completo del sistema de tuberías, es importante identificar claramente las fuentes de entrada y salida de flujo. Esto permitirá entender mejor el comportamiento del fluido dentro del sistema y asegurar una correcta operación y control.

El sistema de tuberías representado anteriormente en el diagrama esquemático incluye los siguientes componentes:

- Tanque de control (TK02 CONTROL)
- Tanque de reserva (TK01 RESERVA)
- válvulas manuales (MV)
- válvulas de control (LV)
- válvulas solenoides (S)
- Manómetros o sensores de presión (PI)
- Bomba centrífuga

4.1.2.1 Identificación de fuentes de entrada

4.1.2.1.1 Entrada al tanque de control (TK02 CONTROL)

Este tanque recibe el fluido a través de una entrada principal ubicada en la parte inferior proveniente de la bomba centrífuga, esta entrada está controlada por una válvula manual (MV) y una válvula de nivel (LV), permitiendo regular el flujo de entrada según las condiciones de control.

4.1.2.1.1 Entrada al tanque de reserva (TK01 RESERVA)

Recibe el fluido desde el tanque de control por medio de dos tuberías, una controlada por dos válvulas (un solenoide y una manual que difiere en otra que funciona como desagüe) y la otra tubería que conecta estos dos tanques con un manómetro que indica la presión que pasa por este tramo. Finalmente tiene otra entrada que es la de ingreso de agua a través proveniente de fuera del sistema por medio de una manguera.

4.1.2.1 Identificación de fuentes de salida

4.1.2.1.1 Salida del tanque de control (TK02 CONTROL)

El tanque tiene dos salidas hacia el tanque de reserva, una ubicada en la parte izquierda la cual tiene una tee con un desvío hacia el desagüe del sistema pasando por una válvula manual (MV) y el otro desvío a través de una válvula manual (MV) y una válvula solenoide (S). En la parte derecha tiene una tubería solo con un manómetro con el fin de tener una circulación de llenado en el sistema.

4.1.2.1.2 Salida del tanque de reserva (TK01 RESERVA)

El tanque tiene una salida principal controlada por una válvula manual que está conectada a la bomba centrífuga del sistema, la cual absorbe y distribuye el fluido a través del sistema.

4.1.3 Identificación y cuantificación de accesorios.

La identificación de los accesorios en cada tramo de tubería se lleva a cabo mediante una revisión del sistema, utilizando el diagrama esquemático como referencia principal. Los accesorios que deben ser identificados incluyen válvulas, codos, tees y cualquier otro componente que afecte el flujo del fluido.

4.1.3.1 Revisión del diagrama esquemático

Se usa el diagrama esquemático para localizar y listar todos los accesorios presentes en cada tramo de tubería.

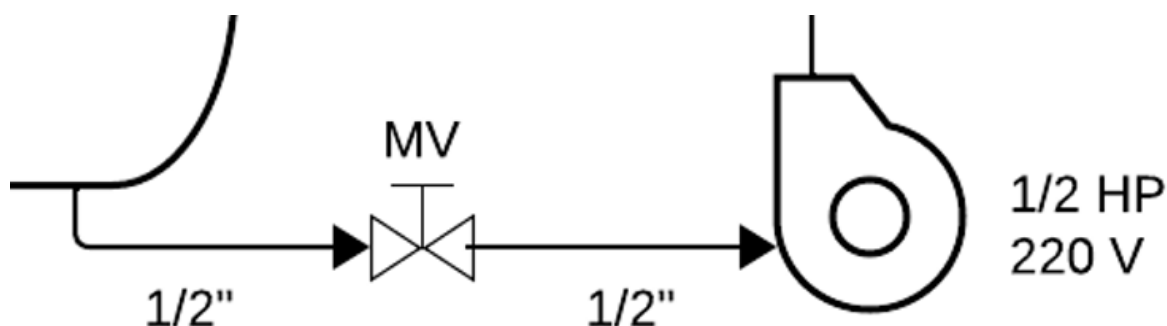


Figura 5 Primer tramo tubería “tanque de reserva – bomba centrífuga”.

Tabla V Accesorios de primer tramo

Accesorio	Medida	Cantidad
Codo de PVC 90 °	1/2"	1
Válvula de bola	1/2"	1

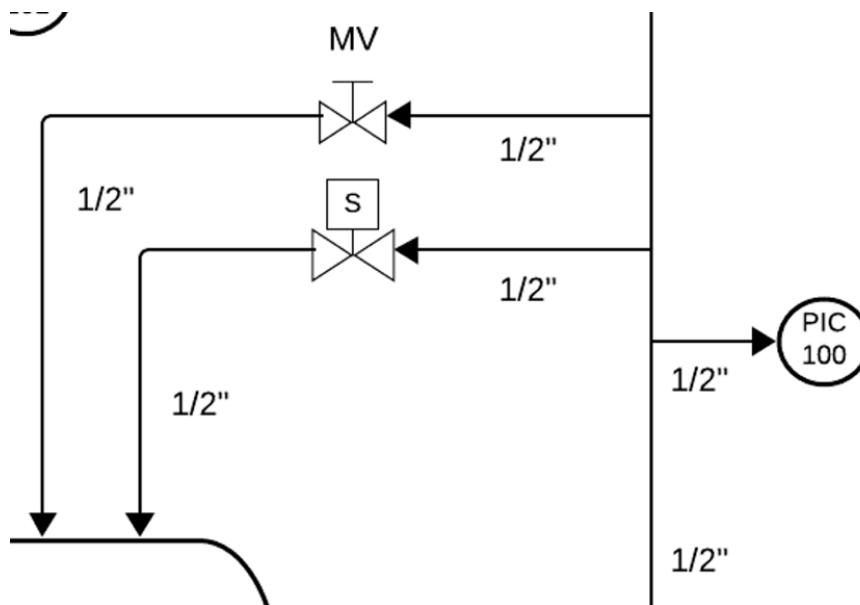


Figura 6 Segundo tramo tubería “bomba centrífuga – manómetro 1 – tuberías de retorno tanque reserva”.

Tabla VI Accesorios segundo tramo.

Accesorio	Medida	Cantidad
Tee de PVC	1/2"	4
Manómetro de glicerina 0-60 psi	1/2"	1
Caudalímetro 10-200 l/min	1/2"	1
Válvula de bola	1/2"	1
Válvula solenoide	1/2"	1
Codo de PVC 90 °	1/2"	2

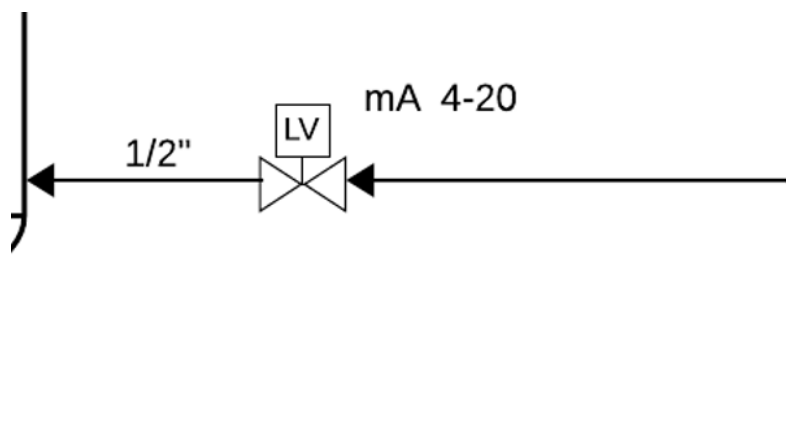


Figura 7 Tercer tramo tubería “bomba centrífuga – tanque de control”.

Tabla VII Accesorios tercer tramo.

Accesorio	Medida	Cantidad
Codo de PVC 90 °	1/2"	1
Válvula proporcional	1/2"	1

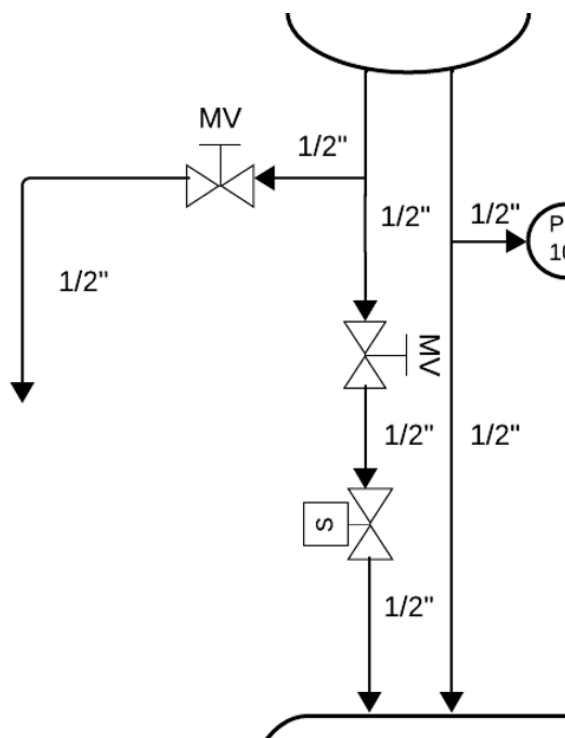


Figura 8 Cuarto tramo tubería “tanque de control – tanque de reserva o desagüe”.

Tabla VIII Accesorios Cuarto tramo.

Accesorio	Medida	Cantidad
Tee de PVC	½"	2
Manómetro de glicerina 0-60 psi	½"	1
Válvula de bola	½"	2
Válvula solenoide	½"	1
Codo de PVC 90 °	½"	1

4.1.3.2 Evaluación de impacto.

Analizar cómo cada accesorio afecta el flujo de fluido es esencial para entender el comportamiento del sistema de tuberías.

4.1.3.2.1 Pérdida por accesorios

Cada accesorio en el sistema de tuberías introduce una resistencia al flujo del fluido, lo que se traduce como pérdida por accesorios. Para calcular cada tipo de accesorio (válvulas, codos, tees), la ecuación 1 representa la pérdida de carga en un accesorio:

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} \text{ (Ecuacion 1)}$$

Donde:

h_f : es la pérdida de carga

K: es el coeficiente de pérdida del accesorio

v: es la velocidad del fluido

g: es la aceleración debido a la gravedad

Para saber todas las pérdidas de carga por accesorio en un sistema de tuberías se pueden sumar dependiendo el tramo en el que se encuentren. Mas adelante en las simulaciones se podrá identificar cada valor de K para cada accesorio en el sistema.

4.1.3 Ecuaciones para el cálculo hidráulico del sistema.

Para realizar un análisis preciso del sistema de tuberías, es importante seleccionar las ecuaciones adecuadas que se aplicarán en el proceso de simulación. La elección correcta de estas ecuaciones garantiza que los resultados obtenidos en las simulaciones sean precisos y fiables, permitiendo así una evaluación detallada del comportamiento hidráulico del sistema.

El diseño y análisis de sistemas de tuberías implican la aplicación de principios fundamentales de la mecánica de fluidos. En el contexto de este proyecto, es necesario considerar una variedad de ecuaciones que aborden aspectos críticos como la pérdida de carga, el equilibrio de fuerzas, y la distribución de presiones y caudales.

4.1.3.1 Ecuación de Bernoulli

La ecuación 2 de Bernoulli en la mecánica de fluidos es usada para describir la conservación de energía en un flujo de fluido ideal. Su importancia en el cálculo hidráulico en tuberías radica en su capacidad para predecir variaciones en la velocidad, presión y altura del fluido, permitiendo el diseño eficiente de sistemas de tuberías y el análisis de pérdidas de carga. La ecuación se utiliza para asegurar que componentes como bombas y válvulas funcionen óptimamente y para evitar problemas como la cavitación y el flujo turbulento excesivo [28].

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \text{ (Ecuacion 2)}$$

Donde:

P es la presión del fluido

ρ es la densidad del fluido

v es la velocidad del fluido

g es la aceleración debido a la gravedad

h es la altura del fluido sobre un punto de referencia

4.1.3.2 Ecuación de pérdidas (Darcy-Weisbach)

La ecuación 3 de Darcy-Weisbach es importante para calcular la pérdida de carga debido a la fricción en tuberías, considerando factores como la longitud, diámetro, velocidad del fluido y el coeficiente

de fricción. Es crucial para el diseño y operación de sistemas de tuberías, permitiendo la determinación precisa de pérdidas de energía, optimización del diseño y evaluación de la eficiencia energética del sistema [29].

$$h_f = f \frac{L * v^2}{D * 2g} \text{ (Ecuacion 3)}$$

Donde:

h_f es la pérdida de carga por fricción (en metros de columna de fluido)

f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)

L es la longitud de la tubería (en metros)

D es el diámetro interno de la tubería (en metros)

v es la velocidad del fluido (en metros por segundo)

g es la aceleración debido a la gravedad

4.1.3.2 Numero de Reynolds y Factor de Fricción

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que caracteriza el tipo de flujo en un sistema de fluidos, distinguiendo entre flujo laminar y flujo turbulento. Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un fluido [30].

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \text{ (Ecuacion 4)}$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido

v es la velocidad del fluido

D es el diámetro interno de la tubería

μ es la viscosidad dinámica del fluido

Una vez dado el resultado, el número de Reynolds se utiliza para predecir el régimen de flujo en el sistema:

- Flujo laminar: $Re < 2000$
- Flujo transitorio: $2000 \leq Re \leq 4000$
- Flujo turbulento: $Re > 4000$

4.1.3.2.1 Factor de fricción

El factor de fricción es un coeficiente adimensional que representa la resistencia al flujo debido a la fricción dentro de la tubería. Para flujo laminar, el factor de fricción se puede calcular directamente a partir del número de Reynolds mediante la ecuación 5:

$$f = \frac{64}{Re} \text{ (Ecuacion 5)}$$

Para flujo turbulento, el factor de fricción es más complejo y depende de la rugosidad relativa de la tubería y del número de Reynolds. Puede ser determinado usando la ecuación implícita de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \text{ (Ecuacion 6)}$$

Donde:

ϵ es la rugosidad absoluta de la tubería.

D es el diámetro interno de la tubería.

Cada una de estas ecuaciones conduce al cálculo de parámetros en el sistema de tuberías, además también se usan en el simulador del programa Pipe Flow Expert.

4.1.4 Desarrollo de simulaciones.

Para asegurar un análisis preciso del sistema de tuberías, es esencial seleccionar y utilizar herramientas de simulación avanzadas que permitan modelar el comportamiento hidráulico bajo diversas condiciones operativas. En este proyecto, se ha decidido utilizar el software Pipe Flow Expert, una herramienta de simulación de flujo de fluidos reconocida por su precisión y capacidad para manejar sistemas de tuberías complejos.

4.1.4.1 Pipe Flow Expert

Pipe Flow Expert es un software de simulación de flujo de fluidos que ofrece una interfaz intuitiva y una amplia gama de funcionalidades para el análisis de redes de tuberías. Entre sus características destacadas se incluyen:

- Soportar la inclusión de una variedad de componentes de sistemas de tuberías, tales como bombas, válvulas, tanques y reguladores de presión.
- Realiza cálculos detallados utilizando ecuaciones hidráulicas estándar, incluyendo Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Bernoulli, para evaluar el rendimiento del sistema.
- Ofrece herramientas de visualización que facilitan la interpretación de resultados y la identificación de posibles problemas en el diseño del sistema.

4.1.4.2 Diseño del sistema

4.1.4.2.1 Tanque de reserva y Tanque de control

Al momento de empezar a realizar el sistema de tuberías se tuvo como ejemplo el diagrama esquemático de la figura 5, se empezó a realizar el diseño por lo más bajo empezando por el tanque de reserva, el cual nos pedía de información inicial la presión superficial, el nivel del líquido y la elevación de salida respecto al piso.

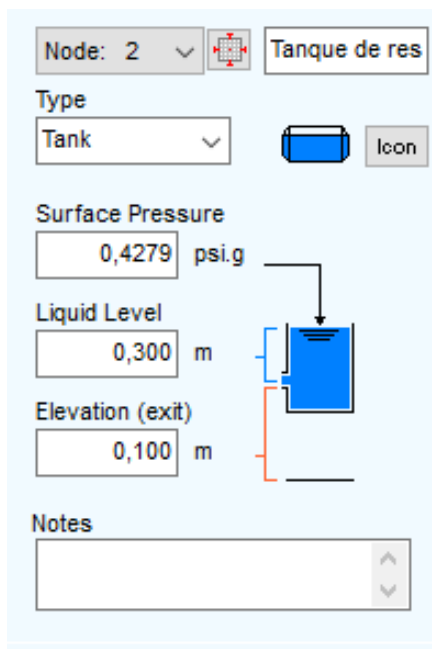


Figura 10 Configuración inicial Tanque de reserva.

Primero establecimos como se muestra en la figura 10 la posición física de cómo va a estar el tanque en la planta real, la cual es en posición horizontal. La salida de líquido que se dirige hacia la bomba va por debajo del tanque, de esta decisión se toman los datos de elevación respecto al piso el cual se decidió como 10 cm o 0,1 m. El nivel del líquido se estableció mediante el diámetro ya que el tanque al estar en posición horizontal su diámetro establece la línea de llenado en la que puede estar, el diámetro del tanque es aproximadamente de 32 cm a 35 cm, se estableció una tolerancia de 5 cm para así establecer un nivel de líquido de 30 cm o 0,3 m como se observa en la figura.

Para establecer una presión superficial en un tanque cerrado se requiere de la ecuación de presión hidrostática, para ello necesitamos valores como la profundidad del líquido en el tanque, la densidad del líquido y la gravedad.

$$P = \rho gh$$

$$P = \left(998 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.86 \frac{m}{s^2}\right) (0.3 m)$$

$$P = 2950.26 Pa$$

Una vez tenemos la presión en Pa el simulador nos la pide en psi a lo cual se convierte en 0,4279 psi, este resultado es finalmente el que se introduce como presión superficial en el tanque de reserva del sistema.

Para el tanque de control cambian los parámetros ya que este tanque está ubicado de manera vertical y la entrada de fluido está por un lateral inferior.

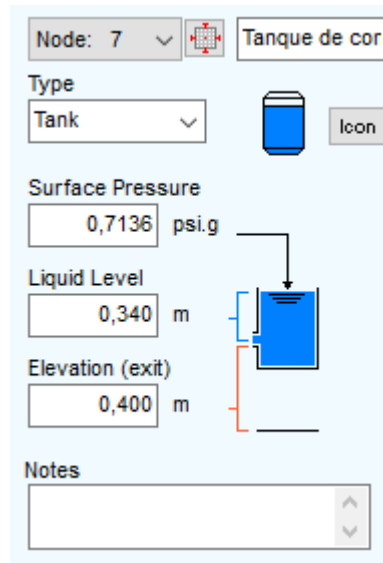


Figura 11 Configuración inicial Tanque de control.

Para este tanque tenemos las tres mismas indicaciones de datos que el tanque de reserva, la elevación se tomó como punto de referencia el piso y la salida del líquido que es por debajo de este, es de 40 cm o 0,4 m, para el nivel de agua desde el tope hasta la abertura de entrada se hizo una diferencia entre el llenado total y el nivel que está por debajo de la abertura de ingreso de líquido, dando como resultado 0,34 m o 34 cm.

Para conocer la presión superficial tomamos el mismo método que realizamos para el tanque de reserva mediante la fórmula de presión superficial, dándonos como resultado 0,7136 psi.

$$P = \rho gh$$

$$P = \left(998 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.86 \frac{m}{s^2}\right) (0.55 m)$$

$$P = 4920.09 Pa$$

4.1.4.2.2 Tuberías y accesorios

Para las tuberías se empezó con la definición de medidas y material, el material que se va a usar en la planta es PVC transparente de $\frac{1}{2}$ “, teniendo claro esto se procedió a ingresar los datos a las tuberías del sistema ya que el simulador por configuración principal arroja otro material con otra medida de diámetro, además de que no haya ningún conflicto de medidas y posibles errores por aumento de diámetros o reducciones.

Pipe data:			(Pipe Id: 2)			
Material	Schedule / Class		Internal Roughness (mm)			
PVC (ANSI)	Sch. 40		0,0050			
Nominal Size	Internal Diam. mm	Wall Thick. mm	Outside Diam. mm	Weight kgs/m	Internal Vol m ³ / 100 m	Surface Area m ² / 100 m
15 mm	15,799	2,769	21,336	0,243	0,0196	6,7029

Figura 9 Configuración material y medidas sistema de tubería.

Una vez establecido el material y medidas a trabajar se empezó con el análisis de tuberías a lo largo del sistema siguiendo como ejemplo el diagrama esquemático anteriormente mencionado.

Para el tema de los accesorios el simulador cuenta con una amplia gama de estos, desde varios tipos de codos, tees y válvulas las cuales tienen valores independientes de K que posteriormente en los resultados de las simulaciones se verán con claridad qué accesorios se usan por cada tramo de tubería colocada, además el simulador cuenta con la configuración de poner el accesorio al inicio o al final del tramo de tubería con el fin de asemejar más esto a un escenario real.

Fittings:		Pipe Size	15 mm	1/2"	Add Selected Item On To Pipe			
Symbol	Type	Metric	Imperial	Description	K			
	SB	15 mm	1/2"	Standard Bend	0,8100			
	LB	15 mm	1/2"	Long Bend	0,4300			
	E45	15 mm	1/2"	Elbow 45 deg.	0,4300			
	RB	15 mm	1/2"	Return Bend	1,3500			
	MB45	15 mm	1/2"	Mitre Bend 45 deg.	0,4100			
	MB90	15 mm	1/2"	Mitre Bend 90 deg.	1,6200			
	Gate	15 mm	1/2"	Gate Valve	0,2200			
	Globe	15 mm	1/2"	Globe Valve	9,2000			
	Angle	15 mm	1/2"	Globe Valve Angled	4,0500			
	Plug	15 mm	1/2"	Plug Valve Straightway	0,4900			
	Bfly	15 mm	1/2"	Butterfly Valve	1,3500			
	BallFB	15 mm	1/2"	Ball Valve Full Bore	0,0900			
	BallRB	15 mm	1/2"	Ball Valve Reduced Bore	2,6000			
	LiftCh	15 mm	1/2"	Lift Check Valve	16,2000			
	AngleCh	15 mm	1/2"	Lift Check Valve Angled	1,5000			
	SwCh	15 mm	1/2"	Swing Check Valve	5,1000			
	ChWaf	15 mm	1/2"	Wafer Check Valve	17,8000			
	Foot	15 mm	1/2"	Foot Valve with Strainer	11,3000			
	Hinged	15 mm	1/2"	Hinged Foot Valve with Strainer	2,0000			
	St	15 mm	1/2"	Strainer	0,6000			
	TT	15 mm	1/2"	Through Tee	0,5400			
	BT	15 mm	1/2"	Branch Tee	1,6200			
	ExitCon	15 mm	1/2"	Pipe Exit to Container	1,0000			
	Open	15 mm	1/2"	Open Pipe Exit	1,0000			
	EntProj	15 mm	1/2"	Pipe Entry Projecting	0,7800			
	EntSharp	15 mm	1/2"	Pipe Entry Sharp	0,5000			

Figura 10 Banco de accesorios para tuberías de 1/2".

A continuación, se verá en la figura 13 un ejemplo de cómo se ven los accesorios en el tramo de tubería 14, representados en el programa como P14 (ver figura 16).

Fittings on: P14, PVC (ANSI), 15 mm ,ID=15,799 mm							(Pipe Id: 14)	
Symbol	Type	Metric	Imperial	Description	K value	Qty	Position	
	BT	15 mm	1/2"	Branch Tee	1,6200	1	Start of Pipe	<div>Total K = 4,22</div> <div>Save</div> <div>Clear</div> <div>Cancel</div>
	BallRB	15 mm	1/2"	Ball Valve Reduced Bore	2,6000	1	End of Pipe	

Figura 11 Ejemplo de accesorios tubería 14.

En este ejemplo podemos observar como este tramo tiene dos accesorios, una tee la cual está configurada de tal manera que el líquido no pase a través si no haga el giro que se necesita. Cuenta con su respectivo valor de K, su cantidad que es una y su posición que es al inicio de la tubería. El siguiente accesorio es la válvula manual que en este caso es tipo bola que tiene también su respectivo valor de K, su cantidad que es una y su posición que es al final de la tubería. Al finalizar la selección y distribución de los accesorios nos da un resultado de K con valor de 4,22 el cual será tomado en cuenta para realizar los cálculos generales de perdidas por accesorios en el sistema.

Otro ejemplo de un tramo de tubería es la tubería 8 o P8 (la cual se puede identificar en la figura 16) en la cual se pueden ver los accesorios y sus respectivos K.

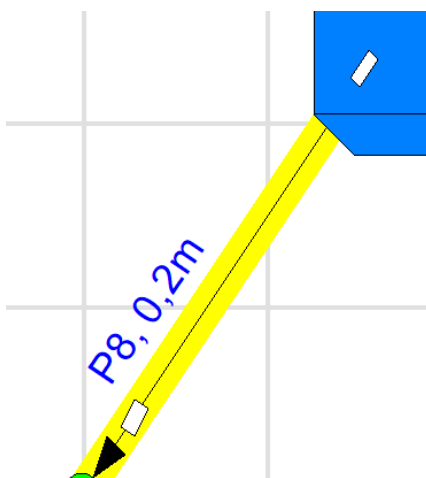


Figura 12 Ejemplo tubería 8.

En este tramo de tubería viene desde el tanque de control con dirección a la tee que conduce hacia el desagüe, este tramo contiene dos accesorios, la tee y la entrada de líquido proveniente de tanque a la tubería como se observa en la figura 14.

Fittings on: P8, PVC (ANSI), 15 mm, ID=15,799 mm (Pipe Id: 8)						
Symbol	Type	Metric	Imperial	Description	K value	Qty
	EntSharp	15 mm	1/2"	Pipe Entry Sharp	0,5000	1
	TT	15 mm	1/2"	Through Tee	0,5400	1

Total K = 1,04

☒ Save

☐ Clear

☐ Cancel

Figura 13 Ejemplo de accesorios tubería 8.

4.1.4.3 Sistema de tuberías

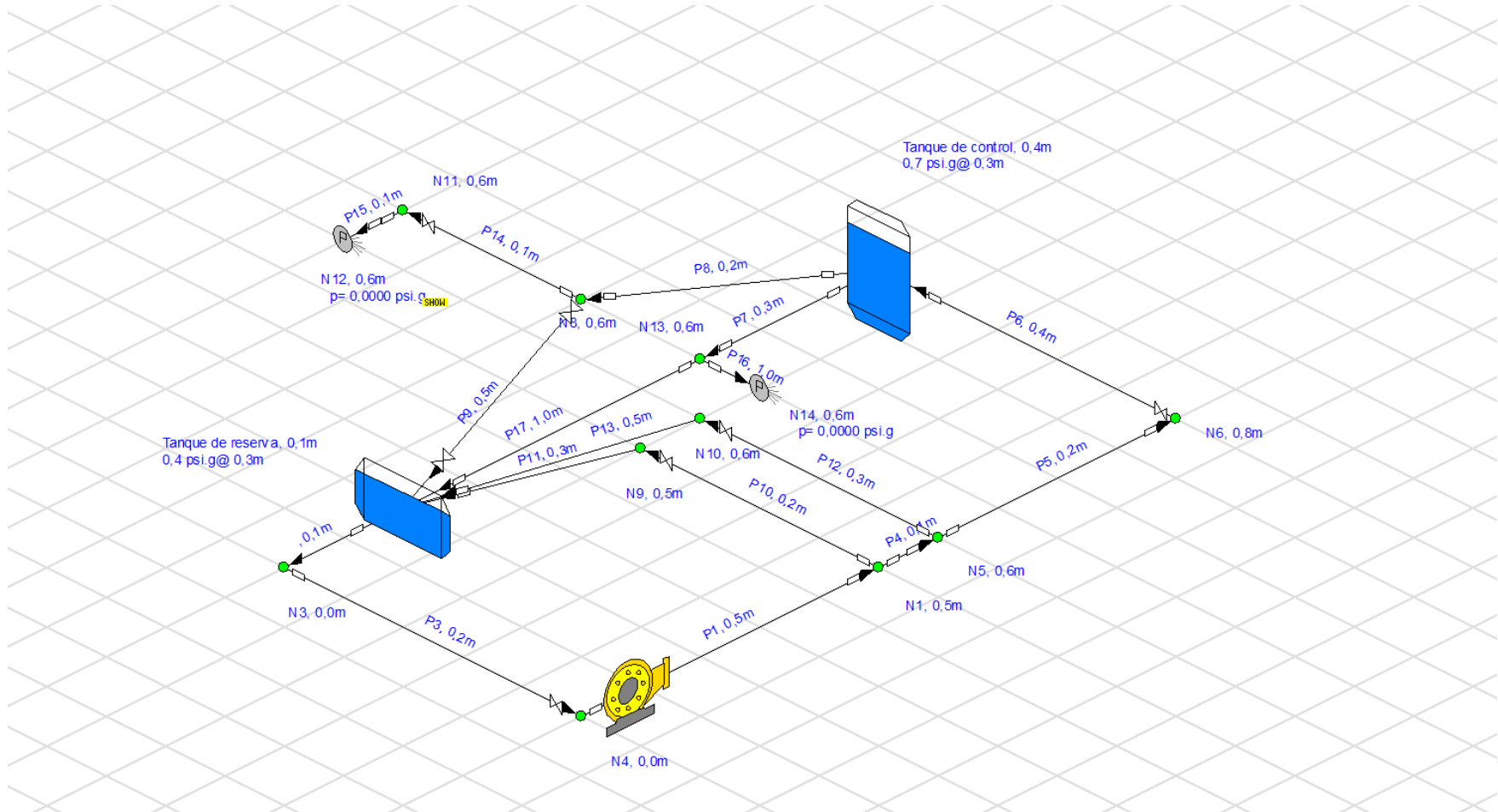


Figura 14 Sistema de tuberías ensamblado.

4.1.4.4 Desarrollo de simulaciones

Una vez se termina la implementación de tuberías y accesorios en el sistema se oprime el botón de calcular, con el cual podremos evaluar diferentes cálculos y datos dados por el simulador basados en un motor de cálculos que contiene:

- Método de solución de flujo no compresible.
- Método de cálculo con la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Modelo de fricción con los factores de fricción de Colebrook-White.

Una vez calculados y que no haya dado ningún error, nos da un reporte en formato PDF donde contiene varias tablas con los datos más relevantes dados en el sistema, además de una gráfica en 2D del sistema donde se muestra la tubería en colores verde, amarillo y rojo que dan a entender la velocidad en m/s del fluido a lo largo del sistema.

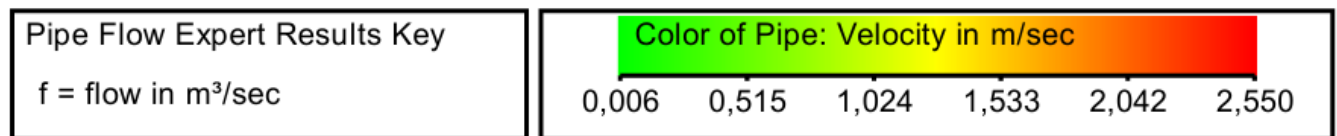


Figura 15 Rangos de velocidad del fluido.

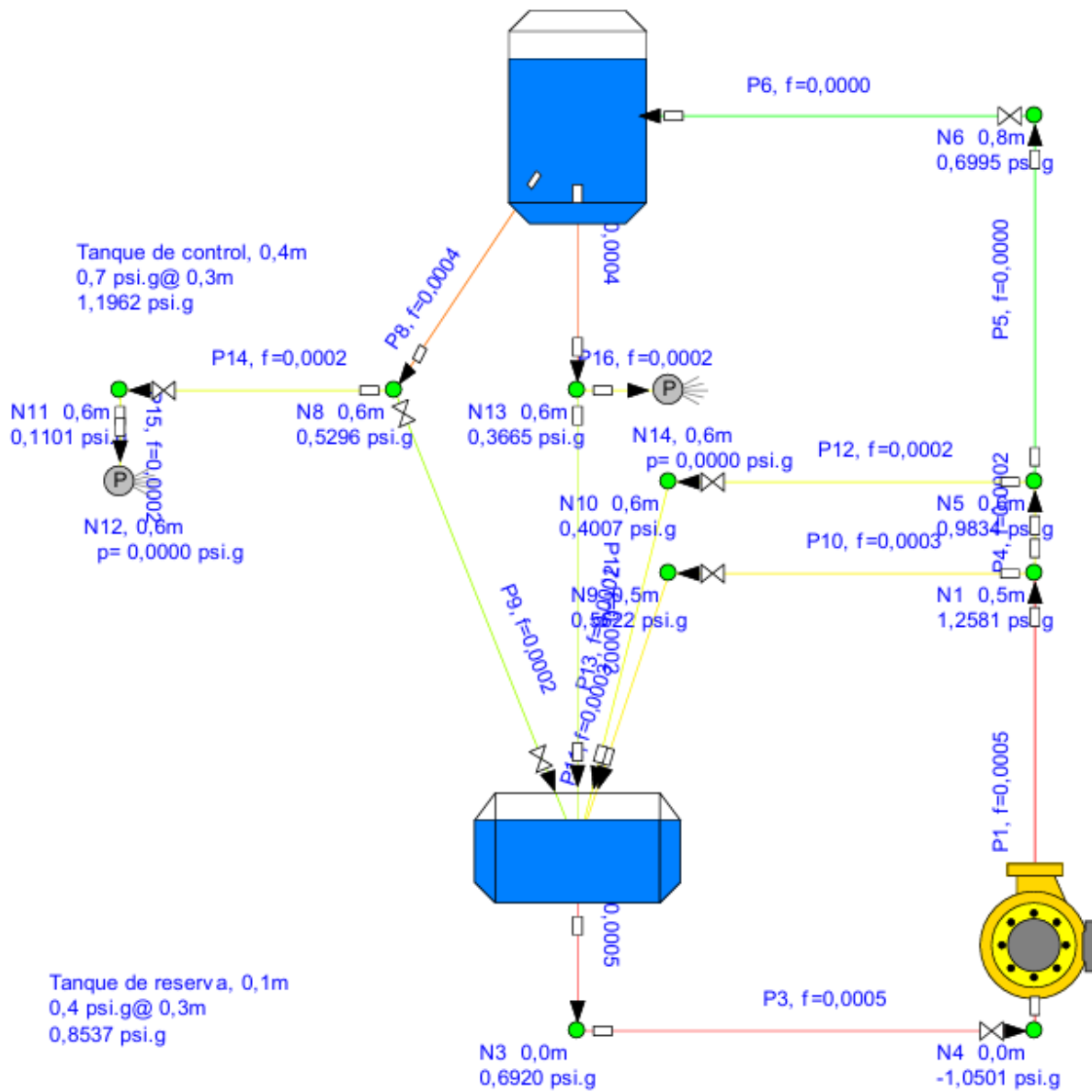


Figura 16 Tuberías representadas por colores de velocidad.

El diagrama muestra el sistema de tuberías con diferentes colores que indican las velocidades del fluido en cada tramo de la tubería. Las velocidades se representan de la siguiente manera:

- Color rojo: Indica una velocidad de aproximadamente 2.5 m/s
- Color amarillo: indica una velocidad entre 1.024 m/s y 1.533 m/s
- Color verde: indica una velocidad entre 0.006 m/s y 0.515 m/s

4.1.4.4.1 Tuberías rojas (Alta velocidad)

P1 y P3 son las tuberías que presentan las velocidades más altas del sistema, aproximadamente 2.5 m/s. Estas velocidades altas pueden ser riesgosas para el sistema y que implican mayor pérdida de energía por fricción con un valor respectivo de 0.001060 kW y 0.000471 kW, estos valores también calculados por la simulación.

4.1.4.4.2 Tuberías amarillas (Velocidad moderada)

P5 y P10 son las tuberías que tienen velocidades de fluido entre 1.024 m/s y 1.533 m/s. Las velocidades moderadas en estos tramos dan a entender un flujo mayor, pero no riesgoso como en las tuberías rojas.

4.1.4.4.3 Tuberías verdes (Baja velocidad)

P2, P4, P6, P7, P8, P9, P11, P12, P13, P14, P15 y P16 son las tuberías que muestran velocidades de flujo más bajas, entre 0,016 m/s y 0,515 m/s. Las bajas velocidades indican menor fricción y pérdida de energía, lo cual es beneficioso para la eficiencia del sistema.

4.1.4.4.4 Tanques

- Tanque de control: presión de 0.7 psi a una altura de 0.3 m.
- Tanque de reserva: presión de 0.4 psi a una altura de 0.3 m.

4.1.4.4.5 Bomba

Indicada en el sistema, asegurando el flujo y la presión requeridos a lo largo del sistema.

El diagrama proporciona una visión clara de la distribución de velocidades y presiones en el sistema de tuberías. Las tuberías rojas requieren atención especial por sus altas velocidades ya que podrían tener problemas de erosión y desgaste, pérdidas por fricción y ruidos o vibraciones, y las verdes muestran un flujo más eficiente, pero deben monitorearse para evitar problemas de sedimentación. La información de presión en los nodos clave ayuda a asegurar que el sistema opere dentro de los parámetros deseados.

4.1.4.5 Datos de la bomba centrífuga

Dentro de los resultados dados por la simulación, tenemos un apartado que proporciona los datos de la bomba en el sistema de tuberías, como se puede ver en la figura 19.

Pipe Id	Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Pref. Op From m ³ /sec	Pref. Op To m ³ /sec	Flow In/Out m ³ /sec	Velocity m/sec	Suction Pressure bar.g	Discharge Pressure bar.g	Pump Head (+) m.hd Fluid	Pump NPSHr m.hd (absolute)	Pump NPSHa m.hd (absolute)	Pump Efficiency Percentage	Pump Power Kilowatts
1	P1	Pump	Set Flow Rate			0,0005	2,550	-0,0987	0,1695	2,740	Not known	9,099	Not known	Not Known

Figura 17 Datos de la bomba entregado por la simulación.

4.1.4.5.1 Interpretación de datos

- **Caudal de flujo:** La bomba maneja un caudal de $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ con una velocidad del fluido de 2.550 m/s . Esta alta velocidad indica un flujo rápido a través de la bomba
- **Presiones de succión y descarga:** La presión de succión es negativa (-0.0987 bar), lo que indica que la bomba está creando un vacío parcial para atraer el fluido. La presión de descarga es positiva (0.1695 bar), lo que muestra que la bomba está impulsando el fluido con una presión mayor que la succión.
- **Cabeza de la bomba:** La cabeza de la bomba es de 2.740 metros de columna de fluido, lo que indica la altura máxima que la bomba puede elevar el fluido debido a su presión.
- **NPSHa (Net Positive Suction Head Available):** 9.099 m.hd , indica la cantidad de presión disponible en la succión de la bomba.

La bomba en el sistema de tuberías opera con un caudal de $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad de fluido de 2.550 m/sec . La presión de succión negativa y la presión de descarga positiva indican un funcionamiento normal de la bomba, creando un vacío parcial y generando una presión suficiente para el flujo. La cabeza de la bomba de 2.740 m y el NPSHa de 9.099 m.hd sugieren que la bomba está bien diseñada para el sistema, ya que para evitar riesgos de posible cavitación de la bomba el NPSHa debe de ser mayor a la cabeza de la bomba, lo cual se cumple según los resultados de la simulación. El reporte proporciona información detallada sobre cada tramo de tubería, incluyendo longitud, flujo de masa, flujo volumétrico, velocidad del fluido, pérdidas por fricción, y presiones de entrada y salida. A continuación, se presenta un resumen con puntos clave [Anexo 2]:

- **Tuberías con alta velocidad (P1, P2, P3):** Velocidades del fluido aproximadamente de 2.550 m/s , seguida de pérdidas significativas por fricción (0.217 m.hd , 0.096 m.hd respectivamente), y finalmente pérdidas en accesorios, especialmente en P3 (0.862 m.hd).
- **Tuberías con velocidad moderada (P7, P8, P10, P11):** estas tuberías tienen velocidades del fluido entre 1.196 m/s y 2.196 m/s , además de tener pérdidas moderadas en los accesorios (0.129 m.hd , 0.061 m.hd , 0.030 m.hd , 0.053 m.hd respectivamente).
- **Tuberías con baja velocidad (P4, P5, P6, P9, P12, P13, P14, P15, P16, P17):** contienen velocidades de fluido entre 0.016 m/s y 1.236 m/s , también tienen pérdidas por fricción bajas, con algunas tuberías como P5 y P6 presentando casi ninguna pérdida por fricción y en cuanto a pérdidas por accesorios es diverso ya que mientras más longitud tengan y conexiones más complejas haya, las pérdidas serán más altas.

4.1.4.7 Datos de los nodos en el sistema

El análisis de los nodos en un sistema de tuberías nos sirve para entender el comportamiento hidráulico del fluido a lo largo de la red. Los nodos representan puntos clave en el sistema donde se miden variables importantes como la presión, la elevación, la demanda y la línea de gradiente hidráulico (HGL). Estos datos permiten evaluar el rendimiento del sistema, identificar posibles problemas y optimizar el diseño.

Dentro de los datos entregados en la simulación se pueden tener en cuenta algunos datos claves en ciertos nodos ubicados en el sistema [Anexo 2]:

- **Presiones en nodos críticos:** el nodo N1 tiene una presión relativamente alta de 1.258 psi.g que no afecta ni presenta problemas, el nodo N4 muestra una presión negativa de -1.0501 psi.g lo cual nos indica la succión normal del fluido por parte de la bomba centrífuga. Y los nodos N12 y N14 tienen presiones de 0.0 psi.g lo cual indica puntos de salida del sistema.
- **HGL (línea de gradiente hidráulico):** Este gradiente hidráulico varía entre los nodos, con valores altos en N1 y valores bajos en N4. El tanque de control N7 tiene un HGL de 1.243 m.hd lo cual certifica su función de mantener la presión.
- **Demanda en los nodos:** no hay demanda de masa o volumen en ninguno de los nodos lo cual nos asegura que no hay ningún proceso de extracción del líquido si no de circulación a través del sistema

Comprender las pérdidas de energía en un sistema de tuberías es crucial para garantizar su eficiencia y rendimiento adecuado. Evaluar cómo la fricción y los accesorios afectan el flujo del fluido en diferentes secciones del sistema permite identificar oportunidades para mejorar el diseño y la operación. Esto asegura que el sistema funcione de manera más eficiente.

A continuación, se presentan los puntos más importantes dados por los datos entregados por la simulación:

- **Pérdidas de energía por fricción:** estas pérdidas varían significativamente por las tuberías, P1 y P3 presentan las mayores pérdidas por fricción con 0.001060 kW y 0.000471 kW respectivamente.
- **Pérdidas de energía por accesorios:** las pérdidas de energía por accesorios son notables en tuberías como P1 (0.002191 kW) y P3 (0.005534 kW), las tuberías P5 y P6 no presentan pérdidas importantes por accesorios.
- **Pérdidas totales:** las pérdidas totales de energía combinan fricción y accesorios, la tubería P3 tiene la mayor pérdida total, seguida por P1, esto es debido en su mayor razón a la velocidad del fluido cuando pasa por estos tramos, seguido del número y tipo de accesorios.

Las principales recomendaciones para disminuir estos valores respecto a las perdidas calculadas en el sistema pueden ir desde reducir la rugosidad de las tuberías, como usar acero inoxidable lo que permite una superficie interna lisa. Minimizar cambios de dirección, se podría realizar un diseño con el menor número posible de codos, curvas y cambios de dirección. El uso de conexiones y accesorios adecuados, utilizar válvulas y accesorios que ofrezcan una baja resistencia al flujo.

4.2 Implementación de instrumentación básica.

4.2.1 Diagrama P&ID.

Para la creación del diagrama P&ID se tuvo en cuenta la norma ANSI ISA 5.1 de simbología de instrumentación, así como el diagrama de desplazamientos mostrado en el análisis hidráulico. [2]

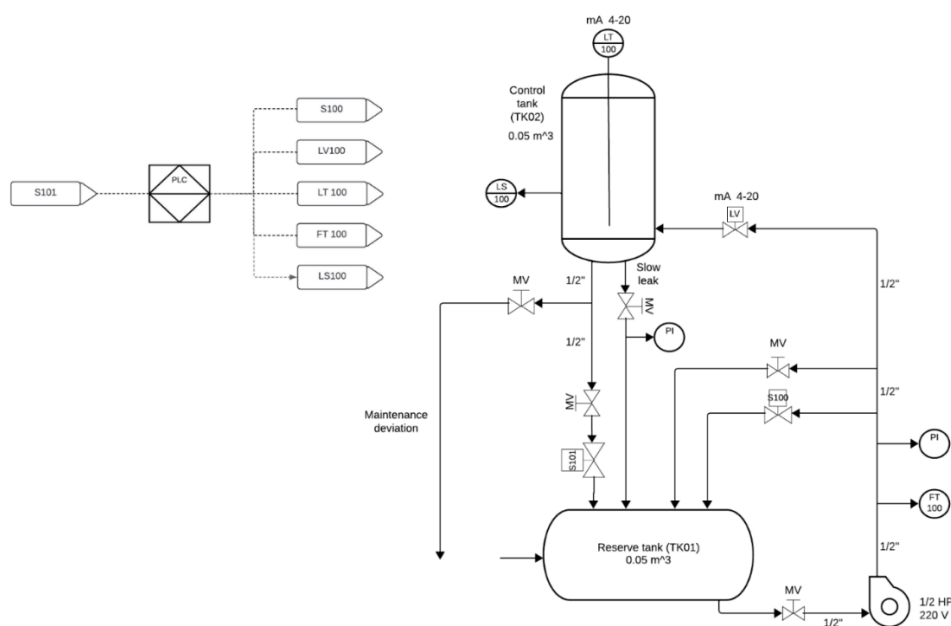


Figura 18 Diseño P&ID

4.2.1.1 Lazo abierto del sistema

En un sistema de control de lazo abierto, el controlador envía una señal al actuador basado únicamente en la señal de referencia o setpoint sin retroalimentación del estado actual del sistema. Este tipo de control no tiene la capacidad de corregir errores ni de responder a perturbaciones que afectan la salida del sistema. Por ejemplo, en un sistema de control de nivel, el controlador ajusta la válvula de entrada de agua para alcanzar un nivel deseado, pero no verifica si el nivel del agua realmente ha alcanzado el valor deseado. Debido a la falta de retroalimentación, los sistemas de lazo abierto son menos precisos y más susceptibles a variaciones y errores en la planta, como cambios en las condiciones de operación o perturbaciones externas.

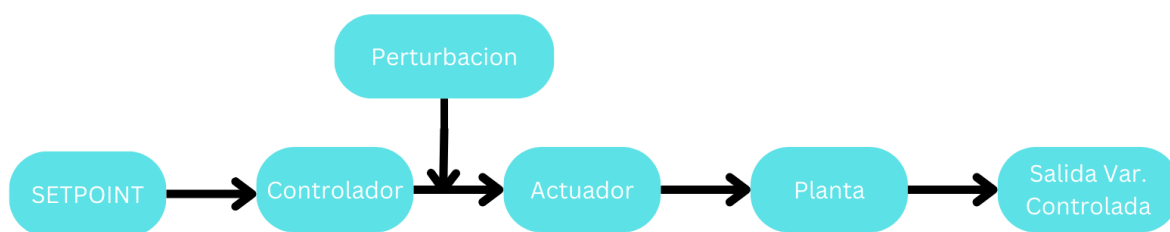


Figura 19 Lazo Abierto

4.2.1.2 Lazo cerrado del sistema

En un sistema de control de lazo cerrado, también conocido como sistema de control con retroalimentación, el controlador ajusta el actuador basado no solo en la señal de referencia o setpoint, sino también en la retroalimentación del estado actual del sistema. El sensor (transmisor de nivel) mide la variable controlada y envía esta información de vuelta al controlador, que compara el valor medido con el valor deseado y calcula el error. El controlador ajusta entonces el actuador para minimizar este error, mejorando la precisión y la capacidad del sistema para corregir perturbaciones. Por ejemplo, en un sistema de control de nivel, el sensor mide continuamente el nivel del agua y envía esta información al controlador, que ajusta la válvula de entrada para mantener el nivel deseado, compensando cualquier perturbación o variación en el sistema.

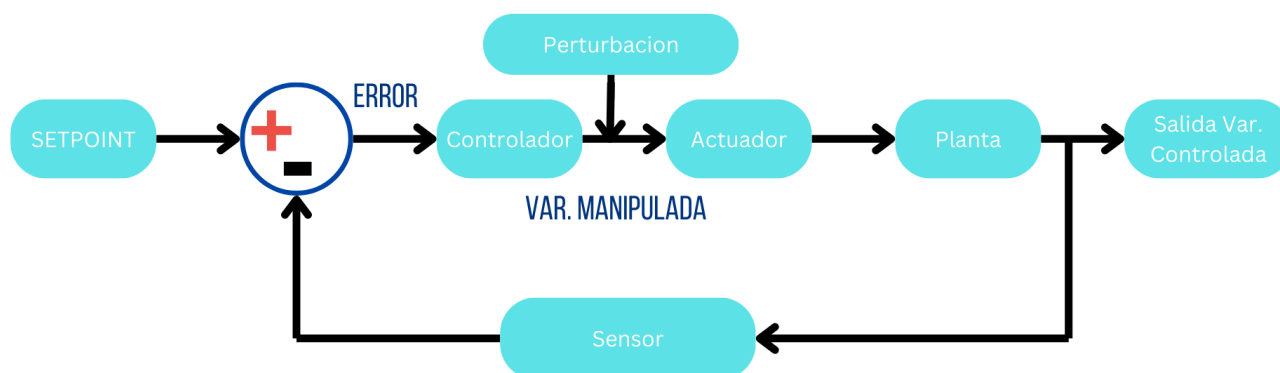


Figura 20 Lazo Cerrado del sistema.

4.2.2 Ubicación y componentes del sistema P&ID

A continuación, en la tabla VIII se muestran los componentes del sistema de control. Cada uno de estos objetos de análisis se encuentran en disposición de la universidad, pues se decidió tomar objetos reales de análisis, para el montaje teórico de este sistema de flujo y nivel, y pueda ser tenido en cuenta para la construcción futura de la planta.

Tabla IX Sensores y actuadores del sistema.

Símbolo	Descripción	Función	Cantidad	Rango de operación
LT100	Transmisor de nivel.	Mide el nivel del fluido en el tanque TK02.	1	Nivel de 4-20 mA
FT100	Caudalímetro	Mide el caudal de salida de la bomba.	1	10 – 200 l/min Presión del agua \leq 1.75 MPa
S100	Válvula solenoide	Vaciado del tanque	1	Digital
S101	Válvula solenoide /	Ciclo de recirculación automático	1	Digital
PLC	Controlador lógico.	Coordina la operación del sistema de control.	1	24V
LV100	Válvula proporcional.	Mantiene el nivel del fluido en el tanque TK02.	1	0 – 100 %
Bomba	Bomba de flujo.	Impulsa el fluido a través del sistema.	1	Flujo masico máximo de 0.5 kg/s

4.2.2.1 Selección de ubicación e importancia para los componentes de instrumentación.

Para la distribución de componentes de instrumentación en el diseño P&ID de la planta de flujo y nivel, fue necesario distinguir y categorizar en 2 diferentes partes. El primer apartado, incluye a componentes de lectura análoga en el sistema (ej: transmisor de nivel), así como el controlador PLC, los cuales tienen como propósito la escala de datos a analizar, conteniendo variables de control de nivel, y cumpliendo con gran parte del sistema automático de llenado. Como segundo apartado, se encuentran los componentes digitales, los cuales son catalogados de protección. Estos componentes cumplen una función clara e importante tanto en la eficiencia de la planta, como en la estabilidad de este, esto se logra ver directamente en los rangos de operación de esta instrumentación, en donde se captan datos de presiones, nivel, y desplazamiento del agua a lo largo del sistema.

4.2.2.1.1 Componentes analógicos del sistema

A continuación, en la tabla IX se presentan los componentes análogos del sistema.

Tabla X Componentes analógicos del sistema

Símbolo	Descripción	Función	Cantidad	Rango de operación
LT100	Transmisor de nivel.	Mide el nivel del fluido en el tanque TK02.	1	Nivel de 4-20 mA
LV100	Válvula proporcional.	Mantiene el nivel del fluido en el tanque TK02.	1	Lectura en mA, entre un 0 – 100% de apertura de la válvula.
FT100	Caudalímetro	Mide el caudal inicial del sistema.	1	10 – 200 l/min Presión del agua \leq 1.75 MPa
PLC	Controlador lógico.	Coordina la operación del sistema de control.	1	24V

La ubicación de estos componentes es puntual en el sistema P&ID propuesto, pues requieren de estar puntualmente asociados a control de nivel del tanque TK02.

- **Transmisor de nivel:** Entrada análoga conectada directamente al tanque TK02 en la parte superior. Es un transmisor por electrodo, por lo que debe de estar siempre en contacto con el fluido, y debe de cumplir con el rango de operación del sistema (20 – 100% de nivel de llenado), así como las especificaciones dimensionales del tanque de análisis.
- **Válvula proporcional:** Salida análoga desde el controlador, conectada en la entrada del sistema del tanque TK02. Es vital la ubicación de esta válvula en este tramo, pues el sistema requiere de una lectura por proporción de los requerimientos de llenado del sistema. Este componente está ligado directamente a la fuga controlada al interior del tanque, pues estos dos puntos representan la entrada y salida del sistema.
- **Caudalímetro:** Entrada análoga conectada al tramo inicial del sistema, se encarga de leer la entrada de caudal en el sistema, posee un rango de operación puntual de 10 – 200 l/min, lo que cumple con las especificaciones máximas de la bomba.
- **Controlador PLC:** El controlador es unitario, y aunque no sea considerado un sensor o actuador en el sistema, este cumple la función de la escala de información, permitiendo la lectura de los datos de los anteriores componentes. Este debe de estar en una localización precisa, para la conexión de cada uno de los componentes digitales o análogos al sistema, a lo largo de los módulos de lectura de este.

4.2.2.1.2 Componentes digitales del sistema.

Tabla XI Componentes digitales del sistema

Símbolo	Descripción	Función	Cantidad	Rango de operación
LS100	Sensor de nivel	Detecta un nivel menor al 20% de llenado.	1	Digital
S100	Válvula solenoide	Vaciado del tanque	1	Digital
S101	Válvula solenoide	Ciclo de recirculación automático	1	Digital

Determinar la ubicación de estos componentes es vital en el sistema P&ID propuesto, pues requieren de estar directamente asociados al desplazamiento y protección del nivel del tanque TK02.

- **Sensor de nivel:** Sensor digital de protección, ubicado específicamente en el tanque TK02 para controlar mediciones menores al 20% de llenado. Esta medida es subjetiva en las aplicaciones de industria, es por ello por lo que tomaremos este porcentaje como nuestra referencia crítica.
- **Válvula solenoide:** Válvula digital ubicado en 2 puntos del sistema. Primer punto, se encarga del proceso de recirculación automático de la planta, pues este cumple en cierta manera la función del segundo punto, y es el vaciado de los tramos de tubería ubicados al inicio del sistema, conectando estos con el tanque de reserva, este debe de estar cerrado el mayor su mayoría de tiempo. Como segundo punto, está el proceso ya mencionado de vaciado del tanque TK02, que al igual que otro punto, este busca el desplazamiento hacia el tanque de reserva.

4.2.2.1.3 Componentes manuales del sistema

- **Manómetro:** Lectura manual en dos puntos del sistema, la primera ubicación en el tramo inicial de desplazamiento del fluido en el sistema, justo antes de los ciclos de recirculación. En segundo lugar, está en la salida de la fuga del sistema del tanque TK02. Este componente es crucial en la toma de presiones del sistema.
- **Válvulas de bola y mariposa:** Estas válvulas son importantes en el funcionamiento de lazo abierto del sistema (modo manual), sin embargo, también tendrían como objetivo la protección y desplazamiento del agua a lo largo del sistema.

4.2.3 Evaluación del sistema primario de instrumentación en Workbench.

El objetivo del este análisis simulado es poner en prueba el sistema de instrumentación primaria real de la planta en Workbench, en búsqueda de evaluar la disposición de los componentes antes mencionados de instrumentación del sistema de control, usando únicamente el controlador PLC y HMI, asegurando que los sensores y actuadores estén correctamente dispuestos, en el sistema P&ID planteado, además de buscar una interfaz completa que interactúe con el usuario.

Componentes de simulación:

- Micro PLC (Allen Bradley 2080-LC50-24QBB)
- HMI (PanelView 800 HMI Terminal 4)
- Generador de corriente (4-20 mA)

- Resistencia electrónica (genérica)
- Voltímetro
- Conexiones + Hub ethernet

4.2.3.1 Simulación de sensores y actuadores

Micro PLC y HMI: El micro PLC Allen Bradley 2080-LC50-24QBB se configuró para recibir señales de entrada de los sensores de nivel y presión. La HMI PanelView 800 se utilizó para monitorear y controlar los parámetros del PID del sistema en tiempo real. La integración de estos componentes permitió una supervisión constante de la funcionalidad de este, y permitir representar de forma simple el control PID del sistema.

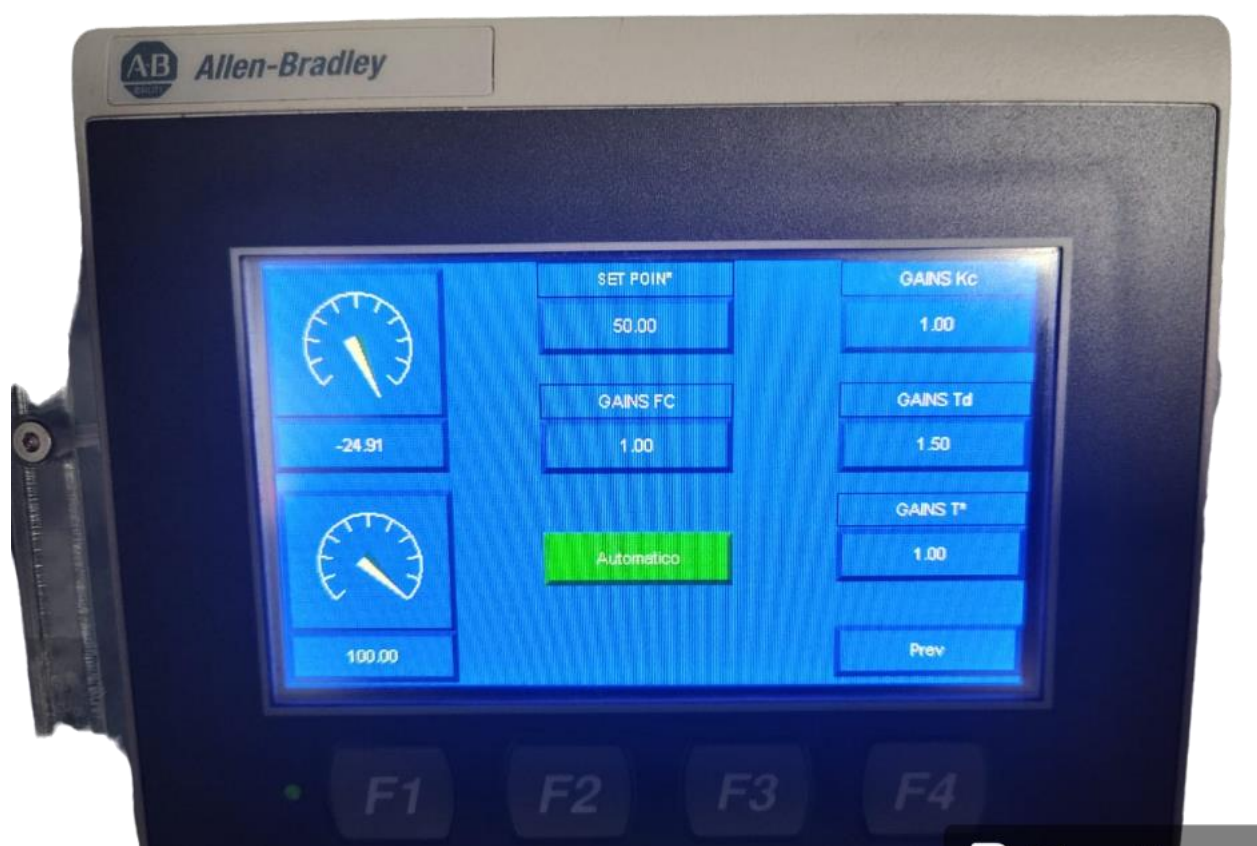


Figura 21 HMI de simulación

Generador de Corriente y Voltímetro: El generador de corriente simuló las señales del transmisor de nivel, utilizando un rango de 4-20 mA, tal como el estándar industrial. El voltímetro se utilizó para verificar que las señales eléctricas estuvieran dentro de los rangos esperados.



Figura 22 Generador de corriente POCKETCAL

Resistencia en el Sistema PID Simulado:

1. Simulación de la Fuga:

En la simulación, esta fuga se representa mediante una resistencia que simula la pérdida continua de fluido de manera controlada y predecible.

2. Modelado de la Resistencia:

La resistencia se introduce en el modelo del sistema como un elemento que impone una restricción al flujo del fluido. Esta resistencia puede estar caracterizada por parámetros como el coeficiente de fricción y el diámetro del orificio, que determinan la cantidad de fluido que se pierde a través de la fuga en un tiempo determinado.

3. Impacto en el Sistema de Control:

La presencia de la resistencia afecta el nivel de fluido en el tanque, creando una perturbación que el sistema de control debe compensar. El controlador, al recibir la retroalimentación del nivel del fluido a través de los sensores, ajustará el actuador para mantener el nivel deseado del fluido a pesar de la fuga constante, en la simulación.

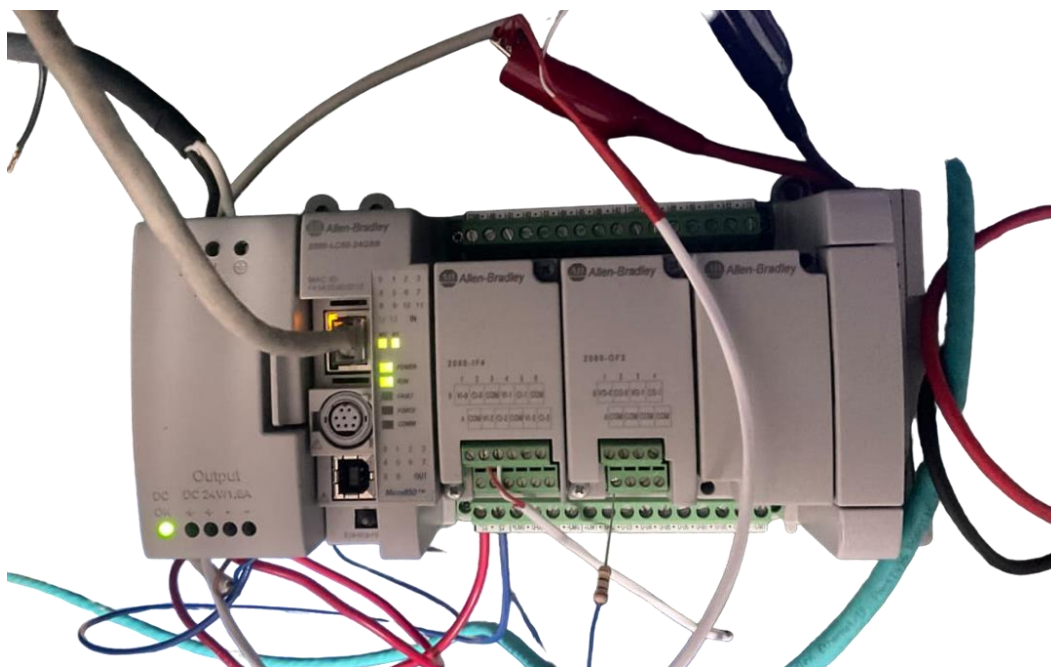


Figura 23 conexión de la resistencia genérica en el módulo del micro PLC

Fuente de corriente: Se suministran 24V a la fuente de poder del micro PLC.

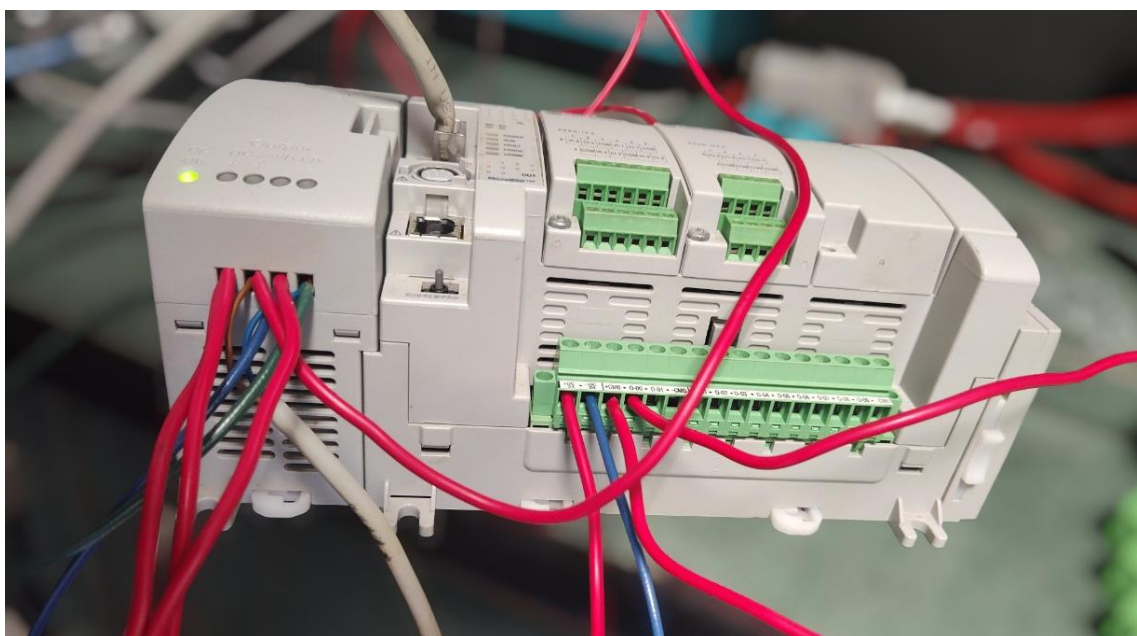


Figura 24 conexión de la fuente de poder del micro PLC

Conexiones de simulación: Conexión vía ethernet, utilizando un centro de múltiples conexiones para lograr la simulación en tiempo real con el funcionamiento del PLC, y el HMI.

4.2.3.2 Simulación de transmisor de nivel.

Para la simulación realizada al transmisor de nivel, se usó un generador de corriente, este contempla valores de entre 4 a 20 mA, simulando una entrada analógica en el sistema. Así mismo, se utilizó una resistencia para simular la fuga continua del sistema. Una vez realizada la conexión de componentes, se registran ciertos valores de corriente, en este caso representando un porcentaje de llenado según la capacidad tanque simulado. Siendo así, se estandarizaron estos valores para cada porcentaje de 10 en 10, hasta el 100% de llenado, encontrados en pruebas de laboratorio realizadas con los parámetros de control, tal y como lo muestra la tabla XII y XIII respectivamente.

Tabla XII Parámetros sintonizados empíricamente con el método lambda.

Parámetro	Valor
Kc	1
Tiempo derivativo (Td) (min)	1.5
Tiempo integral (Ti) (min)	1
Ganancia del controlador PLC	1

Tabla XIII Estandarizaciones de porcentaje de nivel, según los parámetros de control de la simulación práctica.

Nivel de llenado (%)	Corriente (mA)
0	4
10	4.76
20	5.52
30	6.28
40	7.04
50	7.8
60	8.56
70	9.32
80	10.08
90	10.84
100	11.6

4.2.4 Proceso de escalado.

La señal de corriente generada (4-20 mA) debe ser escalada para interpretar correctamente el nivel de llenado del tanque. Este proceso implica convertir la señal eléctrica en un valor cuantitativo que represente el porcentaje de llenado del tanque.

Recepción de Señal: La señal de corriente es recibida por el PLC.

Conversión a Porcentaje: Utilizando una ecuación lineal, la señal de corriente se convierte en un valor porcentual. La fórmula general es:

$$\text{Porcentaje de llenado} = 13.16 \frac{\%}{\text{mA}} * (\text{corriente mA}) - 52.64 \text{ (Ecuacion 7)}$$

Esto significa que para 6.28 mA, el nivel de llenado sería:

$$\text{Porcentaje de llenado} = 13.16\%/mA * (6.28mA) - 52.64 = 30\%$$

Para la realización de la ecuación de llenado, se interpretó la ecuación de la recta, ubicando la pendiente (m) y la intersección (b). Todo el proceso está interpretado en el Anexo 5 del documento.

4.2.5 Diseño de interfaz de simulación.

Para el diseño de interfaz en el HMI, se realizó un gestor de datos adaptativo para el usuario de uso. En la derecha se encuentran todos los parámetros de control para el usuario (ganancias), en la parte central se encuentra igualmente parámetros de control (setpoint + ganancias), así mismo está el botón de activación del sistema de lazo cerrado (automático) o lazo abierto (sistema manual). Por último, tendremos el registro de datos en % de llenado, de forma automática (superior izquierda) y la manual (inferior derecha).

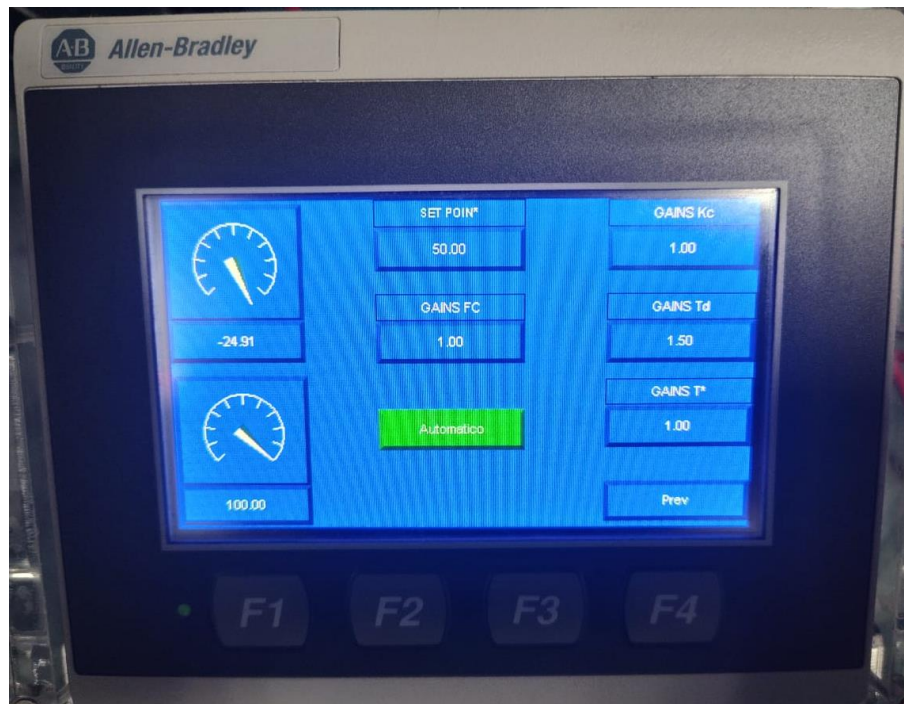


Figura 25 Interfaz HMI del sistema de control PID y parámetros de control.

4.2.6 Aplicación del método lambda en la mejora de sintonía de parámetros

El método lambda es una técnica de sintonización teórica que se utiliza para seleccionar los valores iniciales de control de un sistema PID. Este método es esencial para optimizar el rendimiento del sistema de control, asegurando que la planta funcione de manera eficiente y efectiva. El método lambda se basa en los siguientes principios teóricos:

- **Selección de λ (Lambda):** λ representa la constante de tiempo de lazo cerrado deseada. Un λ más pequeño proporciona una respuesta más rápida pero menos robusta, mientras que un λ mayor ofrece una respuesta más lenta, pero con mayor robustez y menor esfuerzo de control. Para este análisis, λ se seleccionó como un múltiplo del tiempo muerto del proceso para asegurar un margen de ganancia adecuado y una robustez óptima frente a incertidumbres en los parámetros del proceso [18].
- **Balance entre Agresividad y Robustez:** La afinación lambda permite ajustar el balance entre una respuesta rápida y la estabilidad del sistema. Al seleccionar un valor de λ adecuado, se garantiza que el sistema PID pueda reaccionar de manera eficiente a las perturbaciones sin comprometer la estabilidad del proceso. En la tabla IV se presenta el ajuste de parámetros de control, según la velocidad y estabilidad en respuesta del error del sistema.

Con base en las reglas de juego y no poseer un método de sintonía, realizamos el análisis manual de los valores de control, en donde se interpretó de manera empírica el ajuste de estas. A continuación, están los valores por cada parámetro de control.

4.3 Resultados del análisis estructural y de desplazamiento del tanque TK02

El análisis de desplazamiento en el tanque TK01 se llevó a cabo utilizando SolidWorks Flow Simulator y un tanque de referencia (Plastank TC 60), para evaluar el comportamiento del fluido dentro del tanque de control, en condiciones de operación simuladas. Este análisis es crucial para validar el diseño del tanque y asegurar que el sistema funcione de manera eficiente y segura [Anexo 3].

El tanque en cuestión es tomado como referencia bajo las medidas de la planta de flujo y nivel anterior, en donde vimos la oportunidad de reutilizar un tanque que teníamos a la mano, siguiendo las restricciones de diseño planteadas anteriormente, siendo así, estas son sus características:

- Altura: 620 mm
- Diámetro: 320 mm

En cuanto al material, no es igual al original de la planta, este es de HDPE, y se realizara el análisis a modo de propuesta para una implementación futura. A continuación, en la figura 26, se aprecia el tanque de referencia.



Figura 26 Tanque referencia.

4.3.1 Condiciones de frontera

- **Fluido:** Agua
- **Temperatura inicial:** 20°C
- **Caudal masico de salida:** 0.0012 kg/s
- **Caudal masico de salida:** 0.4297 kg/s

4.3.2 Estabilización del sistema de desplazamientos

A modo de estabilizar el sistema de control del tanque TK02, se plantearon las siguientes variables, tal como lo muestra la figura 25, buscando la estabilización del sistema planteado de desplazamiento del fluido.

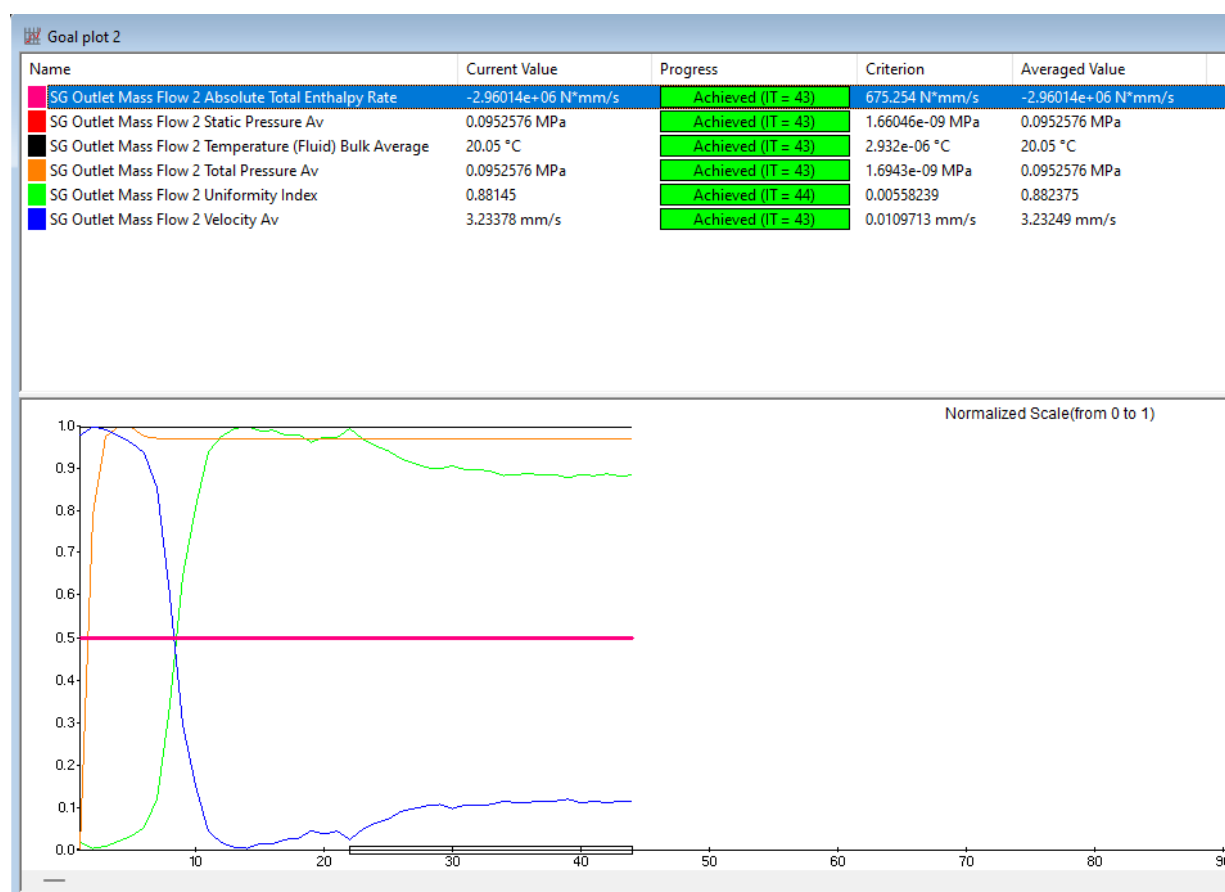


Figura 27 Estabilización del sistema de desplazamiento del tanque de control.

En la tabla XIV se muestran los valores significativos para determinar que el sistema del tanque de control TK02 posee una estabilización en el desplazamiento del fluido.

Tabla XIV Valores de estabilidad por parámetro.

Parámetro	Valor Obtenido	Unidad
Presión promedio	0.0952576	MPa
Temperatura final	20.05	°C
Velocidad promedio	3.2	mm/s
Coeficiente de uniformidad	0.88145	
Flujo de entrada	0.0012	Kg/s
Flujo de salida	0.4297	Kg/s

4.3.2.1 Desplazamiento del tanque de control TK02

En la siguiente figura se muestra la visualización del tanque de control en SolidWorks y la distribución del fluido. Tanto las flechas, como tubos de simulación indican el desplazamiento del agua a lo largo del tanque TK02. Así mismo, en una distribución de colores en cuanto a la presión interna del tanque, encontramos que no sobre pasa ningún límite del material (HDPE), además de lograr la altura máxima del tanque en su desplazamiento.

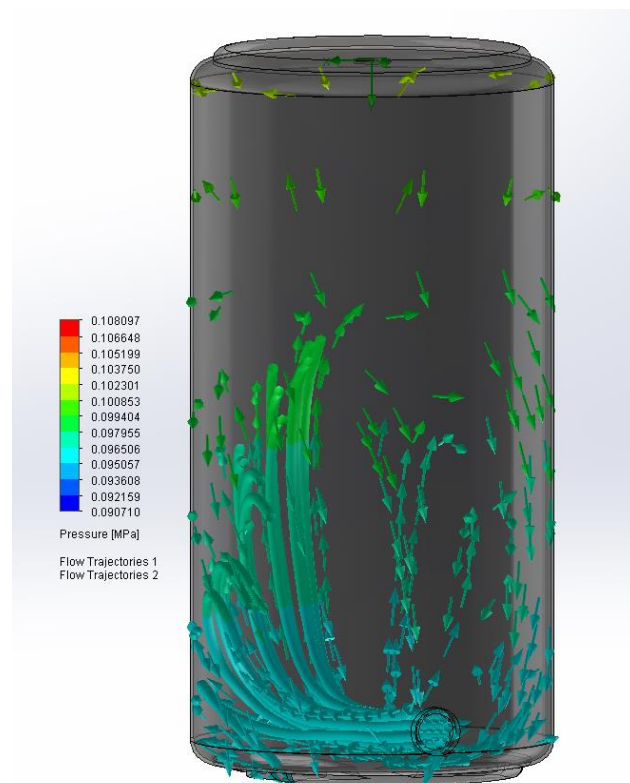


Figura 28 Simulación de control de llenado del tanque.

4.3.3 Estado de los tanques de la planta original

Para iniciar el análisis de los tanques de la planta, se realizó un diagnóstico detallado del estado actual de los tanques existentes, hechos de láminas de acrílico transparente. Este diagnóstico incluyó una inspección visual y una evaluación de funcionalidad para identificar las deficiencias y necesidades de mejora.

Durante la inspección visual, se observaron varias áreas problemáticas en los tanques de acrílico transparente.

El Tanque de Reserva presenta una estructura desgastada y acumulación de sedimentos en el fondo, tal como lo muestra la figura 29.



Figura 29 Tanque de reserva original.

El Tanque 1 muestra manchas de óxido en las paredes internas, indicando posible corrosión de los componentes internos. Las válvulas y conexiones también presentan desgaste y acumulación de residuos, como se ilustra en la siguiente imagen.

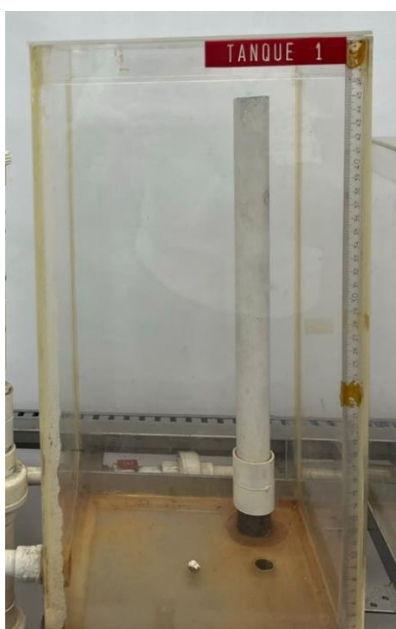


Figura 30 Tanque de control 1 original.

El Tanque 2 presenta condiciones similares a las del Tanque 1, con corrosión en las paredes internas y desgaste en las conexiones. La acumulación de residuos es evidente, lo que puede afectar la eficiencia del sistema.

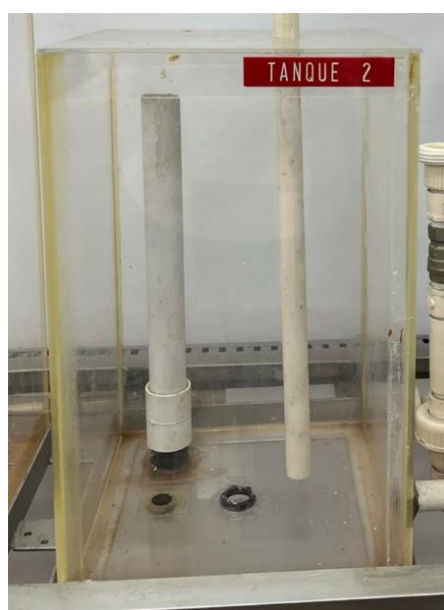


Figura 31 Tanque de control 2 original.

Estas condiciones sugieren que los tanques actuales no son adecuados para un funcionamiento eficiente y duradero en la planta. La estructura de acrílico transparente, aunque útil para la visualización directa, no ofrece la durabilidad ni la resistencia necesarias para soportar las condiciones operativas de la planta.

4.3.4 Diseño de Rehabilitación

El diseño de los tanques de la planta es crucial para asegurar que el sistema pueda manejar eficientemente los fluidos bajo diferentes condiciones operativas. Los tanques originales, con láminas de acrílico transparente, tenían limitaciones en cuanto a durabilidad y resistencia a la presión. Por lo tanto, se decidió rediseñar los tanques utilizando **HDPE** (Polietileno de alta densidad) para mejorar la estructura y el rendimiento del sistema [Anexo 3].

Comparación de Materiales:

Tabla XV Comparación de propiedades de los materiales.

Propiedad	Acrílico Transparente	HDPE
Resistencia a la presión	Moderada, riesgo de fractura	Alta, soporta altas presiones
Durabilidad	Menor, susceptible a agrietarse	Alta, resistente a impactos
Resistencia química	Moderada	Alta, resiste ácidos y bases
Transparencia	Alta, permite visualización directa	Baja, opaco
Facilidad de mantenimiento	Moderada, difícil de limpiar	Alta, fácil de limpiar
Costo	Relativamente alto	Moderado, costo-efectivo

El cambio a HDPE se justificó principalmente por la necesidad de un cambio en su geometría, específicamente cilíndrico. Las normativas ASME BPVC y ASME B31 guían el diseño y la fabricación de tanques para soportar presiones altas y evitar fallas estructurales. HDPE, a diferencia del acrílico, es altamente resistente a impactos y tiene una vida útil prolongada, lo cual es esencial para aplicaciones industriales [4][5].

Además, HDPE ofrece una alta resistencia química, conforme a las normativas ASME e ISA, que especifican la selección de materiales resistentes a los fluidos procesados. Esto asegura que los tanques no se deterioren rápidamente debido a la exposición a ácidos, bases y otros productos químicos, manteniendo la integridad estructural.

Otro aspecto importante es la facilidad de mantenimiento. HDPE es más fácil de limpiar y mantener en comparación con el acrílico, lo que reduce el tiempo de inactividad y los costos asociados con el mantenimiento. Las prácticas de mantenimiento industrial, alineadas con las normativas ASME B31, destacan la importancia de seleccionar materiales que faciliten el mantenimiento regular y eficiente.

En términos de diseño geométrico, se optó por una geometría cilíndrica horizontal para los tanques. Esta decisión se basó en varios factores clave. Primero, la geometría cilíndrica permite una distribución de presión más uniforme,

evitando puntos de tensión que pueden causar fracturas. Los estándares ASME BPVC y B31 respaldan esta elección, asegurando que el diseño cumple con los requisitos de resistencia y seguridad.

Además, los tanques cilíndricos horizontales optimizan el uso del espacio disponible en la planta, permitiendo una mayor capacidad de almacenamiento sin comprometer el espacio. Esto es crucial para maximizar la eficiencia operativa y asegurar que el sistema pueda manejar el volumen de fluido requerido sin exceder los límites de espacio de la planta [2][4][5].

4.3.5 Validación y Estabilidad del Funcionamiento.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los cálculos teóricos realizados para evaluar la integridad estructural del tanque de HDPE bajo las condiciones de diseño especificadas. Se verificará la adecuación del factor de seguridad conforme a los estándares de la industria.

Presión interna del tanque de control obtenidos en la simulación de **PipeFlow**:

- $P_{int} = 1.20 \text{ psi}$ [Anexo 2]

4.3.5.1 Análisis de Esfuerzos

Los cálculos teóricos de los esfuerzos tangenciales circunferenciales y longitudinales se realizaron considerando los cálculos realizados en la simulación de Pipe Flow Expert, en donde la presión interna del tanque es 1.20 psi, el radio interno de 0.16 m y el espesor de pared de 2 mm. Los resultados obtenidos fueron:

- **Esfuerzo Circunferencial:** 0.654 MPa [Anexo 4]
- **Esfuerzo Longitudinal:** 0.327 MPa [Anexo 4]

4.3.5.2 Cálculo del Factor de Seguridad

El factor de seguridad se determinó utilizando la resistencia a la tracción del HDPE según el estándar ISO 527, que se encuentra en un rango entre 20-28 MPa [N]. En las siguientes ecuaciones desarrolladas en el anexo 4 se presenta el factor de seguridad mínimo y máximo para cada uno de los esfuerzos (circunferencial y longitudinal) del tanque de control:

Para el Esfuerzo Circunferencial ($\sigma\theta$):

$$FS_{min} = \frac{20}{0.654} = 30.58 \text{ [Anexo 4]}$$

$$FS_{max} = \frac{28}{0.654} = 42.81 \text{ [Anexo 4]}$$

Para el Esfuerzo Longitudinal (σL)

$$FS_{min} = \frac{20}{0.327} = 61.16 \text{ [Anexo 4]}$$

$$FS_{max} = \frac{28}{0.327} = 85.63 \text{ [Anexo 4]}$$

4.3.5.3 Verificación con Estándares

El análisis del factor de seguridad para el tanque de HDPE con un espesor de pared de 2 mm y una presión interna de 1.2 psi, utilizando los estándares relevantes, revela que los factores de seguridad obtenidos (30.58 para el esfuerzo circunferencial y 61.16 para el esfuerzo longitudinal) son significativamente altos en comparación con los estándares industriales típicos de 1.5 a 2. Estos resultados indican un diseño extremadamente seguro, respaldado por las propiedades de tracción del HDPE según la norma ISO 527, que asegura la consistencia y fiabilidad de los valores de resistencia a la tracción utilizados [6].

Además, según las directrices de la American Water Works Association (AWWA) y los factores de diseño aplicados a materiales plásticos como el HDPE, que implican un factor de seguridad de aproximadamente 1.59, el diseño actual del tanque está sobredimensionado para la presión operativa especificada. La norma SP001 de STI/SPFA, aunque se enfoca en tanques de acero, proporciona directrices generales aplicables a todos los tipos de tanques, resaltando la importancia de mantener un margen de seguridad adecuado para garantizar la durabilidad y fiabilidad a largo plazo del tanque [7][30].

4.4 Evaluación del Desempeño mediante Software de Simulación para el Proceso Completo de la Planta

El objetivo de este análisis es optimizar la dinámica del proceso de control de nivel de agua en un sistema de lazo cerrado. Se desarrollo un modelo matemático preciso del sistema, diseñando un controlador PID adecuado y validando su efectividad mediante simulaciones en MATLAB, Simulink. La estabilidad y precisión del control de nivel son esenciales para garantizar la eficiencia operativa y la seguridad del sistema.

4.4.1 Descripción del sistema

El sistema de control de nivel de agua incluye los siguientes componentes:

Componente	Rango de operación
Tanque de control (TK02)	0.05 m^3 (50 litros)
Transmisor de nivel (LT100)	4-20 mA
Válvula proporcional (LV)	Controla el flujo de entrada de agua al tanque.
Fuga constante	Simula una salida constante de agua del tanque.
Tanque de reserva (TK01)	Recoge el agua drenada del tanque de control.
Válvula solenoide (S100)	Utilizada para vaciar rápidamente el tanque de control.
Bomba	Recircula el agua desde el tanque de reserva al tanque de control.

4.4.2 Datos del sistema

Se presentan los datos iniciales a los cálculos de la dinámica del proceso del sistema. Así mismo, en el anexo n se presenta el cálculo cada uno de estos datos.

Tabla XVI Datos iniciales de la dinámica del proceso.

Variable	Valor	Unidades
Capacidad del Tanque de Control	0.05	m^3
Área Transversal del Tanque	1.024	m^2
Ganancia de la Válvula Proporcional (K_v)	25	m^3/mA
Constante de Tiempo del Sistema (τ)	30	segundos
Flujo de Fuga Constante (Q_{out})	$0.001 \text{ m}^3/\text{s}$	m^3/s

Rango del Transmisor de Nivel (LT100)	30	cm
Señal de Salida del Transmisor	4-20	mA
Capacidad Máxima de la Bomba	30	L/min
Potencia de la Bomba	0.5	HP
Capacidad de flujo de la Válvula Solenoide (S100)	0.000583	m³/s
Capacidad de flujo (Cv)	2.1	m³/h
Caída de presión	0.5 – 10 bar (7 – 145 psi)	psi, bar
Temperatura del Agua	20	°C
Presión de Operación	0.7	psi

4.4.3 Modelo matemático del sistema

El modelo matemático se basa en la ecuación de balance de masa y las características de los componentes del sistema.

4.4.4 Ecuación de Balance de Masa

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}}{A}$$

Donde:

- $H(t)$ es el nivel de agua en el tanque en el tiempo t .
- $Q_{in}(t)$ es el flujo de entrada al tanque, controlado por la válvula proporcional.
- Q_{out} es el flujo de salida constante debido a la fuga.
- A es el área transversal del tanque (1.024 m²).

4.4.4.1 Flujo de entrada

El flujo de entrada $Q_{in}(t)$ está controlado por la válvula proporcional y es una función de la corriente de entrada $I(t)$:

$$Q_{in}(t) = K_v * I(t)$$

Donde:

- K_v es la ganancia de la válvula (25 m³/mA).

4.4.4.2 Flujo de Salida (Fuga):

- El flujo de salida Q_{out} es constante y se representa $Q_{out} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.4.3 Modelo de Primer Orden

La relación entre el nivel del tanque y la corriente de entrada se expresa como:

$$\tau \frac{dH(t)}{dt} + H(t) = K_v * I(t)$$

Donde:

- $\tau = 30$ segundos.
- $K_v = 25 \text{ m}^3/\text{mA}$.

4.4.4.4 Función de transferencia

Tomando la transformada de Laplace de la ecuación diferencial, obtenemos la función de transferencia:

$$\frac{H(s)}{I(s)} = \frac{K_v}{\tau s + 1}$$

Sustituyendo los valores:

$$\frac{H(s)}{I(s)} = \frac{25}{30s + 1}$$

4.4.4.5 Diseño del Controlador PID

El diseño del controlador PID se basa en este modelo de primer orden. Las ganancias calculadas son:

Tabla XVII Parámetros de control del modelo de primer orden.

Parámetro	Valor	Unidad
Kp	1.44	
Tiempo Integral (Ti)	60	segundos
Tiempo Derivativo (Td)	15	segundos

4.4.4.6 Implementación y Simulación en MATLAB y Simulink

Para validar el modelo y el controlador PID, se utiliza MATLAB y Simulink para simular la respuesta del sistema, bajo el boceto de lazo cerrado en la figura 32. Es así, que en la Figura siguiente están presentes las condiciones del sistema, desde los resultados de la dinámica del proceso.

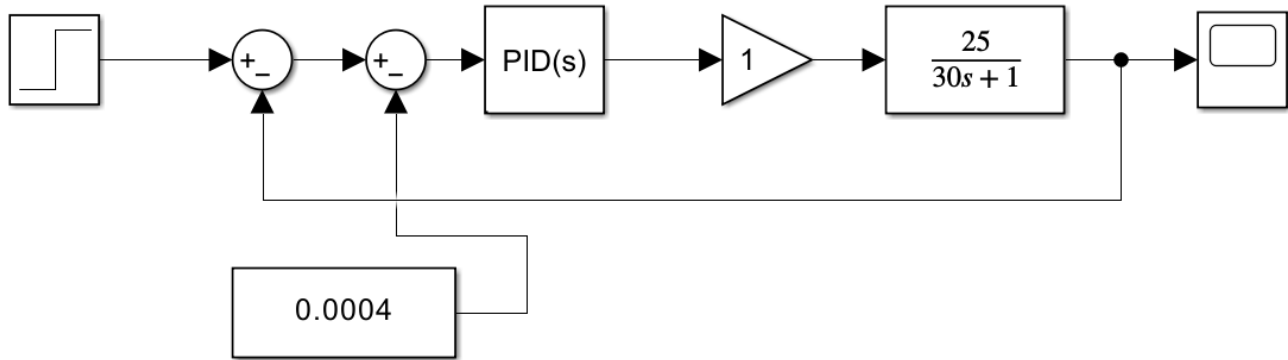


Figura 32 Lazo cerrado del sistema de simulación.

4.4.4.6.1 Componentes del Modelo

- **Generador de Señal (Step):** Representa la entrada del sistema.
- **Sumador (Sum):** Calcula el error entre el setpoint y la salida del sistema.
- **Controlador PID:** Ajusta la respuesta del sistema para minimizar el error.
- **Función de Transferencia (Transfer Fcn):** Representa la dinámica del tanque.
- **Constante de Fuga:** Simula la pérdida de fluido en el sistema.
- **Scope:** Herramienta para visualizar la respuesta del sistema.

4.4.4.6.2 Parámetros por cada bloque funcional

- **Constante de Fuga:** $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$ [Anexo 2]
- **Ganancia del Proceso (K):** 25
- **Constante de Tiempo (τ):** 30 s
- **Parámetros PID:**
 - **Proporcional (Kp):** 1.44, **Integral (I):** 60 seg, **Derivativo (D):** 15 seg

4.4.4.6.3 Resultados de simulación

- **Nivel del tanque (setpoint):** 1 (100% del volumen del tanque)
- **Tiempo para alcanzar el setpoint:** Aproximadamente 100 segundos
- **Desviación del nivel del tanque respecto al setpoint:** ± 0.02

4.4.4.6.4 Análisis de Desempeño

Para evaluar el desempeño completo de la planta, están los siguientes puntos:

Estabilidad: El sistema se considera estable si, después de una perturbación o cambio en la entrada, la salida del sistema se ajusta y se mantiene en un valor constante sin oscilaciones o divergencias significativas, como en la figura 27. En la simulación, se observa que el nivel del tanque alcanza el estado estacionario y se mantiene alrededor del valor deseado sin oscilaciones significativas ni tendencias a divergir. Esto indica que el controlador PID ha logrado estabilizar el sistema de manera efectiva.

Robustez: La robustez de un sistema de control se refiere a su capacidad para manejar variaciones y perturbaciones en las condiciones operativas sin perder el control del proceso. En la simulación, se introduce una perturbación constante de $0.0004 \text{ m}^3/\text{s}$ en forma de fuga. A pesar de esta perturbación, el sistema ajusta su salida y mantiene el nivel del tanque cercano al setpoint deseado. La capacidad del sistema para manejar esta perturbación sin desviarse significativamente demuestra su robustez.

Precisión: La precisión del sistema se mide por la capacidad del controlador para mantener el nivel del tanque lo más cercano posible al setpoint deseado. En la simulación, el nivel del tanque se ajusta rápidamente al valor de setpoint y se mantiene cercano a este valor con una mínima desviación. Esto indica que el sistema tiene una alta precisión en el control del nivel del tanque.

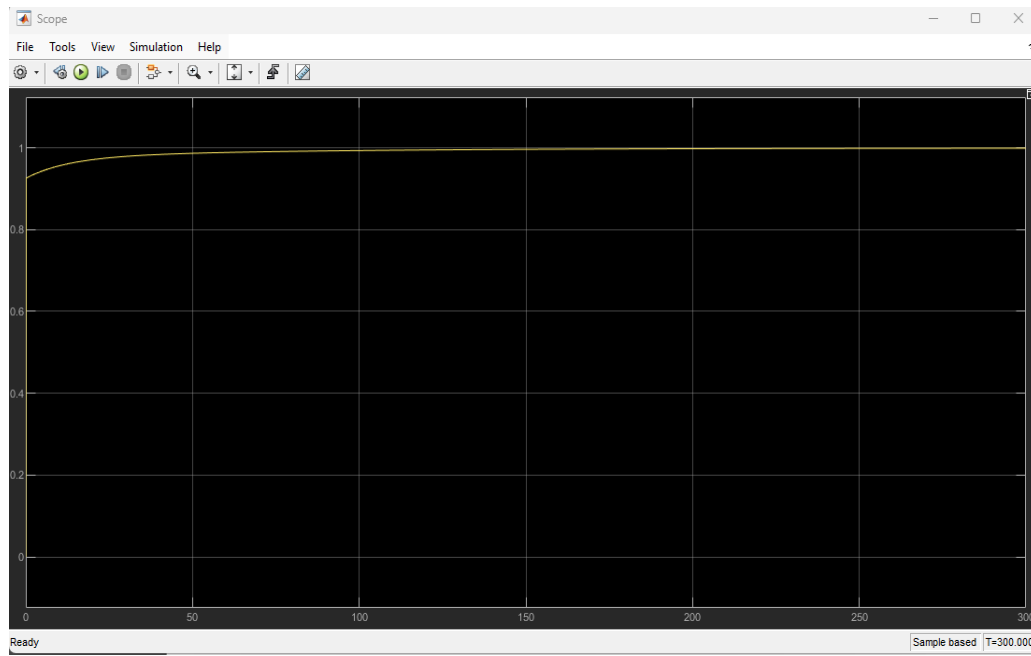


Figura 33 Simulación del lazo cerrado del sistema.

5. Conclusiones

5.1 Estabilización del modelo dinámico del proceso

La dinámica del proceso del sistema de control de nivel ha sido modelada y analizada utilizando una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo de 30 segundos y una ganancia de 25 m/mA. La simulación en Matlab ha demostrado que el sistema puede mantener la estabilidad del nivel de líquido a pesar de perturbaciones y una fuga constante modelada mediante una resistencia. Estos resultados se evidencian en la capacidad del sistema para ajustar el nivel del líquido y mantenerlo cerca del valor deseado, minimizando el error en estado estacionario.

La estabilización del sistema al 100% de capacidad del tanque es crucial para asegurar que el sistema pueda manejar condiciones operativas extremas y mantener el control preciso del nivel de líquido bajo todas las circunstancias. Los resultados de las simulaciones muestran que el controlador PID es eficaz en reducir el sobre impulso y mejorar la precisión del control de nivel. Esto es esencial para garantizar la fiabilidad y seguridad del sistema, permitiendo que el nivel del líquido se mantenga dentro de los límites deseados incluso frente a perturbaciones significativas. La adecuada sintonización del controlador PID ha sido clave para asegurar un desempeño óptimo del sistema, destacando la importancia de una correcta modelización y ajuste de los parámetros del controlador. Este enfoque proporciona una herramienta robusta para la enseñanza y el aprendizaje en ingeniería de control, preparando a los estudiantes para enfrentar desafíos reales en la industria.

5.2 Desempeño del Sistema de Control PID Simulado

El sistema de control PID implementado en Simulink ha demostrado ser estable, robusto y preciso bajo las condiciones simuladas. La simulación muestra que el controlador PID ajusta efectivamente la salida del sistema para minimizar el error y alcanzar el estado estacionario. Además, el sistema puede manejar perturbaciones inesperadas, como la fuga, y estabilizarse en el tiempo. Finalmente, la precisión del control de nivel se mantiene dentro de los límites aceptables, asegurando que el nivel del tanque se mantenga cercano al setpoint deseado.

Es importante recalcar que este análisis se ha realizado en un entorno simulado, el cual no contiene todas las variables y condiciones que pueden aparecer en la implementación real de la planta. Por lo tanto, aunque los resultados son prometedores, será necesario realizar pruebas adicionales y ajustes en el entorno real para asegurar que el sistema funcione adecuadamente en todas las condiciones operativas posibles.

5.3 Comparación de los parámetros de control entre las pruebas de laboratorio y el modelo dinámico del proceso

A partir de la simulación realizada en Workbench y la dinámica de proceso, se plantean diferencias en los parámetros de control, uno modificado empíricamente según las reglas del método lambda, y la otra siguiendo una estructura de un método matemático sintonizado a las especificaciones técnicas de sistema PID como presenta el documento. Siendo así, se logra ver una diferencia significativa en los valores de estos, en la siguiente tabla XVIII está la comparación:

Tabla XVIII Comparación de los parámetros de control obtenidos.

Parámetro	Valor Workbench	Valor (Dinámica del proceso)	Diferencia
Kc	1	1.44	+0.44
Tiempo derivativo (Td) (seg)	90	60	-30 seg
Tiempo integral (Ti) (seg)	60	15	-45 seg

Los resultados de comparación muestran diferencias significativas en la sintonía empírica y aquella que tiene un modelo matemático enfocado en el sistema PID del documento. Es por ello, que se recomienda realizar nuevamente el laboratorio practico con los parámetros de control sintonizados, para poder observar una escala correcta del porcentaje de llenado, para partir de una base más realista y solida a una posible implementación futura.

5.4 Hidráulica del sistema

El proyecto de diseño y validación de la planta de flujo y nivel se centró en la creación de un sistema optimizado utilizando herramientas avanzadas de simulación como Pipe Flow Expert. Se desarrolló un diagrama esquemático detallado que incluyó todos los componentes principales del sistema, como tanques, válvulas y tuberías. Las simulaciones realizadas mostraron que el sistema opera eficientemente, con una distribución de velocidades de flujo que oscila entre 0.016 m/s y 2.550 m/s. Las tuberías en rojo indicaron velocidades altas que podrían causar erosión y desgaste, mientras que las tuberías en verde mostraron velocidades más bajas y eficientes. La presión de succión negativa de -0.0987 bar y la presión de descarga positiva de 0.1695 bar.g fueron confirmadas como normales para el funcionamiento de la bomba centrífuga seleccionada, una Pretul de 1/2 HP.

Además, se verificó que el NPSH disponible (9.099 m) es significativamente mayor que el NPSH requerido (2.740 m), asegurando la ausencia de cavitación en la bomba. Este análisis detallado permitió identificar y mitigar posibles problemas operativos, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente del sistema. El diseño validado no solo cumple con los estándares técnicos y de seguridad, sino que también proporciona una plataforma robusta para la educación práctica de estudiantes de ingeniería en la Pontificia Universidad Javeriana, mejorando su comprensión y habilidades en el control de fluidos y procesos industriales.

5.5 Coeficiente de uniformidad

El análisis de desplazamiento realizado, indica un coeficiente de uniformidad de 0.88 en el tanque de control TK02. Esto representa un buen y uniforme desplazamiento del fluido (agua) a lo largo del tanque. Así mismo, con base en la figura 28 con la fuga constante de 1/2" logra llegar hasta el punto más alto del tanque, sin poseer una alta carga de presión, por lo que es posible la estabilidad del sistema en cualquier punto de este.

5.6 Impacto Educativo

La implementación teórica de la planta de flujo y nivel tiene el potencial de mejorar la formación de los estudiantes de ingeniería en la Pontificia Universidad Javeriana. Al incorporar una herramienta de mucha utilidad, se enriquece el aprendizaje práctico y se profundiza en la comprensión de los procesos industriales relacionados con el control y la medición de fluidos. Esta experiencia no solo facilita la asimilación de conceptos teóricos, sino que también proporciona a los estudiantes un entorno seguro y controlado donde pueden experimentar y aprender de manera más efectiva. Además, el uso de esta tecnología prepara a los estudiantes de manera integral para enfrentar los desafíos reales en sus futuras carreras profesionales en el campo de la ingeniería, brindándoles una ventaja competitiva en el mercado laboral.

6. Recomendaciones

6.1 Trabajos futuros

Para futuros trabajos, se recomienda investigar la viabilidad de utilizar otros materiales alternativos que puedan ofrecer beneficios adicionales, como una mayor ligereza, sin comprometer la integridad estructural. Además, se podrían realizar estudios más detallados sobre la durabilidad del HDPE bajo diversas condiciones operativas a largo plazo. Los datos obtenidos resultaron demostrar que el tanque se encuentra sobre adimensionado, por lo que una fabricación de los tanques ya sea en HDPE u otro material adecuado, puede ser pertinentes para una mayor visibilidad y eficiencia de la planta, pensando en una implementación futura.

Referencias

- [1] M. Barrios Velasco, C. Jiménez Castro, y A. Martínez, "Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico para el Control de Flujo y Nivel," *Pontificia Universidad Javeriana Cali*, 2002.
- [2] ANSI/ISA 5.1-2022, "Instrumentation Symbols and Identification," *American National Standards Institute*, 2022. [Online]. Available: <https://blog.ansi.org/ansi-isa-5-1-2022-instrumentation-symbols/>.
- [3] API Specification 5CT, 10th Ed., "Casing and Tubing," American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2018.
- [4] ASME BPVC, "Boiler and Pressure Vessel Code," American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [5] ASME B31.3-2022, "Process Piping," American Society of Mechanical Engineers, 2022.
- [6] ISO 527-1:2019, "Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles," *International Organization for Standardization*, 2019. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/75824.html>.
- [7] SP001, "Standard for the Inspection of Aboveground Storage Tanks," *Steel Tank Institute/Steel Plate Fabricators Association*, 2022. [Online]. Available: <https://stispfa.org/library-resources/standards-regulatory-resources/sp001-standard/>.
- [8] "Lecture 30: Thin-Walled Pressure Vessels," Massachusetts Institute of Technology, 2006. [Online]. Available: https://ocw.mit.edu/courses/2-070-undergraduate-and-masters-level-advanced-mechanics-of-materials-fall-2006/lecture-notes/lecture_30.pdf.
- [9] "Water & Wastewater Level Controls | Automatic & Electronic." Waterline Controls. [Online]. Available: <https://www.waterlinecontrols.com/>.
- [10] "Bomba Eléctrica De Agua Periferica 1/2hp Pretul 27019 | Soelco". Soelco | Soelco. [En línea]. Disponible: <https://soelco.co/producto/bomba-electrica-de-agua-periferica-1-2hp-pretul-27019/>
- [11] SenTec, "Mastering Process Instrumentation in the Petrochemical Industry: A Comprehensive Guide," cdSentec, 2023. Disponible: <https://cdsentec.com/mastering-process-instrumentation-in-the-petrochemical-industry>
- [12] "Optimum level and flow control for food industry processes," *Food Manufacturing*, [Online]. Available: <https://foodmanufacturing.net/optimum-level-and-flow-control-for-food-industry-processes>.
- [13] "International Federation of Pharmaceutical Manufacturers & Associations (IFPMA)," [Online]. Available: <https://www.ifpma.org/>.
- [14] STI/SPFA Standards, "Safety Factors in AWWA Water Pipe Design." Disponible en: STI/SPFA Standards

- [15] "Control de Procesos para la Regulación de Caudal, Nivel, Presión y Temperatura | EDIBON ®." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.edibon.com/es/control-de-procesos-para-la-regulacion-de-caudal-nivel-presion-y-temperatura>
- [16] "Generatoris." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.generatoris.com/home/producto-detalle/equipo-para-estudio-de-control-de-presiundefinedn-nivel-temperatura-y-flujo>
- [17] "Máquina para mezcla de combustibles - GlobeCore." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://globecore.com/es/products/sistemas-de-mezcla/fuel-blending-systems/>
- [18] "Unidad de regulación de caudal, de nivel, de presión y de temperatura - Elettronica Veneta S.p.A." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.elettronicaveneta.com/es/prodotto/regulacion-de-caudal-de-nivel-de-presion-y-de-temperatura/>
- [19] "PLANTAS PTAR - Aguas Residuales." Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.syner-tech.com.co/aguas-residuales/ptar>
- [20] "Herramienta de Sintonización de Controladores PI y PID Basada en el Método Lambda," *Control Engineering Practice*, vol. 6, no. 5, pp. 641-648, 1998.
- [21] A. Muntaser y N. Buaossa, "Sistema No Lineal de Tanques Acoplados; Modelado y Control de Nivel usando Técnicas PID y Lógica Difusa," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 317-324, 2012.
- [22] "Lucidchart," Lucid Software, 2023. [Online]. Available: <https://www.lucidchart.com>.
- [23] "Level Transmitters: Basics, Types, Applications, and Benefits," Inst Tools, 2023. [Online]. Available: <https://instrumentationtools.com/level-transmitters/>. [Accessed: 10-Jun-2024].
- [24] "Pneumatic Control Valves," Emerson Electric Co., 2023. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/pneumatic-control-valves>. [Accessed: 10-Jun-2024].
- [25] "Pressure Relief Valves," Swagelok, 2023. [Online]. Available: <https://www.swagelok.com/en/product/Valves/Pressure-Relief-Valves>. [Accessed: 10-Jun-2024].
- [26] "Pressure Sensors," TE Connectivity, 2023. [Online]. Available: <https://www.te.com/usa-en/products/sensors/pressure-sensors.html>. [Accessed: 10-Jun-2024].
- [27] "Pumps and Pumping Equipment," Grundfos, 2023. [Online]. Available: <https://www.grundfos.com/products/find-product/pumps>. [Accessed: 10-Jun-2024].
- [28] R. L. Mott, "Mecánica de Fluidos", 6ª ed., México: Pearson Educación, 2006.

[29] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard, "Introduction to Fluid Mechanics," 8th ed., John Wiley & Sons, 2011.

[30] S. T. I. "Safety Factors in AWWA Water Pipe Design: How Do You Evaluate Them and What Do They Mean?" STI/SPFA, 2023. [Online]. Available: <https://stispfa.org/safety-factors-in-awwa-water-pipe-design-how-do-you-evaluate-them-and-what-do-they-mean/>.

6. Anexos

6.1 Anexo 1: Curva de la bomba de referencia – Ficha técnica

Para analizar el desplazamiento en el punto más crítico del sistema, se analizará caudal máximo de aplicación de la bomba (30L/min) [8].

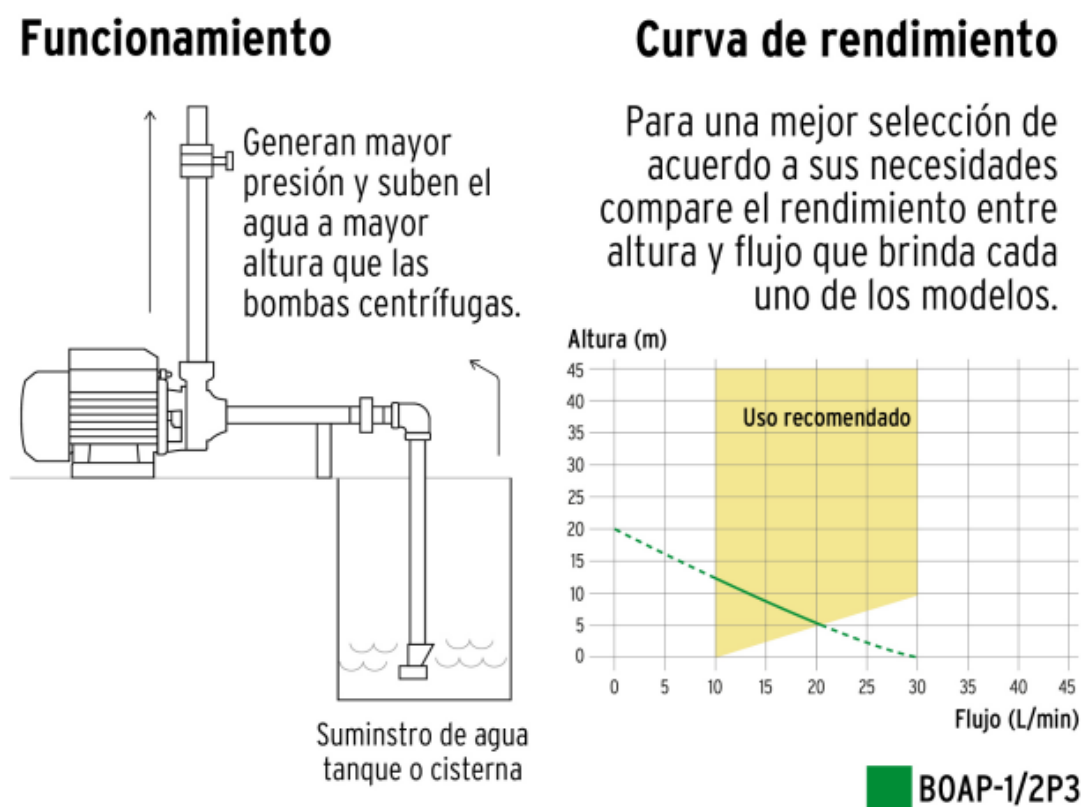


Figura 34 Curva de rendimiento de la bomba de referencia.

6.2 Anexo 2: Diseño en Pipe Flow - Diagrama sistema hidráulico

Fluid Data

Zone	Fluid Name	Chemical Formula	Temperature °C	Pressure bar.g	Density kg/m³	Centistokes	Centipoise	Vapour Pressure bar.a	State
1	Water	H2O	20,000	0,0000	998,00000	1,004008	1,002000	0,024000	Liquid

Figura 35 Propiedades del agua.

Pump Data

Pipe Id	Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Pref. Op From m³/sec	Pref. Op To m³/sec	Flow In/Out m³/sec	Velocity m/sec	Suction Pressure bar.g	Discharge Pressure bar.g	Pump Head (+) m.hd Fluid	Pump NPSHr m.hd (absolute)	Pump NPSHa m.hd (absolute)	Pump Efficiency Percentage	Pump Power Kilowatts
1	P1	Pump	Set Flow Rate			0,0005	2,550	-0,0987	0,1695	2,740	Not known	9,099	Not known	Not Known

Figura 36 Información de la bomba.

Pipe Data

Pipe Id	Pipe Name and Notes	Length m	Mass Flow kg/sec	Vol Flow m³/sec	Velocity m/sec	Friction Loss m.hd	Entry Fitt. Loss m.hd	Exit Fitt. Loss m.hd	dP Total Loss bar	Entry Pressure bar.g	Exit Pressure bar.g
1	P1	0,450	0,4990	0,0005	2,550	0,217	0,269	0,179	-0,1591	-0,0724	0,0867
2	P2	0,100	0,4990	0,0005	2,550	0,048	0,166	0,000	0,0112	0,0589	0,0477
3	P3	0,200	0,4990	0,0005	2,550	0,096	0,269	0,862	0,1201	0,0477	-0,0724
4	P4	0,100	0,2370	0,0002	1,211	0,013	0,040	0,040	0,0189	0,0867	0,0678
5	P5	0,200	0,0012	0,0000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,0196	0,0678	0,0482
6	P6	0,400	0,0012	0,0000	0,006	0,000	0,000	0,000	-0,0343	0,0482	0,0825
7	P7	0,350	0,4297	0,0004	2,196	0,129	0,123	0,133	0,0572	0,0825	0,0253
8	P8	0,200	0,3879	0,0004	1,982	0,061	0,100	0,108	0,0460	0,0825	0,0365
9	P9	0,500	0,1631	0,0002	0,834	0,033	0,111	0,128	-0,0223	0,0365	0,0589
10	P10	0,200	0,2620	0,0003	1,339	0,030	0,148	0,312	0,0480	0,0867	0,0388
11	P11	0,350	0,2620	0,0003	1,339	0,053	0,000	0,091	-0,0201	0,0388	0,0589
12	P12	0,300	0,2358	0,0002	1,205	0,038	0,120	0,253	0,0402	0,0678	0,0276
13	P13	0,450	0,2358	0,0002	1,205	0,057	0,000	0,074	-0,0312	0,0276	0,0589
14	P14	0,100	0,2248	0,0002	1,149	0,012	0,109	0,175	0,0289	0,0365	0,0076
15	P15	0,050	0,2248	0,0002	1,149	0,006	0,055	0,067	0,0076	0,0076	0,0000
16	P16	1,000	0,2419	0,0002	1,236	0,132	0,126	0,000	0,0253	0,0253	0,0000
17	P17	1,000	0,1878	0,0002	0,960	0,084	0,025	0,047	-0,0336	0,0253	0,0589

Figura 37 Análisis de sistema de tubería.

Pipe Fittings

Pipe Id	Pipe	Fitting Position	Description	Imperial Size	Metric Size	Database Ref	K Value	Quantity	K Total	Entry K Total	Exit K Total
1	P1	Start of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
1	P1	End of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
										0,8100	0,5400
2	P2	Start of Pipe	Pipe Entry Sharp	1/2"	15 mm	EntSharp	0,5000	1	0,5000		
										0,5000	0,0000
3	P3	Start of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
3	P3	End of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
										0,8100	2,6000
4	P4	Start of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
4	P4	End of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
										0,5400	0,5400
5	P5	Start of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
5	P5	End of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
										0,5400	0,8100
6	P6	Start of Pipe	Butterfly Valve	1/2"	15 mm	Bfly	1,3500	1	1,3500		
6	P6	End of Pipe	Pipe Exit to Container	1/2"	15 mm	ExitCon	1,0000	1	1,0000		
										1,3500	1,0000
7	P7	Start of Pipe	Pipe Entry Sharp	1/2"	15 mm	EntSharp	0,5000	1	0,5000		
7	P7	End of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
										0,5000	0,5400
8	P8	Start of Pipe	Pipe Entry Sharp	1/2"	15 mm	EntSharp	0,5000	1	0,5000		
8	P8	End of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
										0,5000	0,5400
9	P9	Start of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
9	P9	Start of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
9	P9	End of Pipe	Pipe Exit to Container	1/2"	15 mm	ExitCon	1,0000	1	1,0000		
9	P9	End of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
										3,1400	3,6000
10	P10	Start of Pipe	Branch Tee	1/2"	15 mm	BT	1,6200	1	1,6200		
10	P10	End of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
10	P10	End of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
										1,6200	3,4100
11	P11	End of Pipe	Pipe Exit to Container	1/2"	15 mm	ExitCon	1,0000	1	1,0000		
										0,0000	1,0000
12	P12	Start of Pipe	Branch Tee	1/2"	15 mm	BT	1,6200	1	1,6200		

Figura 38 Accesorios por tramo de tubería.

Pipe Id	Pipe	Fitting Position	Description	Imperial Size	Metric Size	Database Ref	K Value	Quantity	K Total	Entry K Total	Exit K Total
12	P12	End of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
12	P12	End of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
										1,6200	3,4100
13	P13	End of Pipe	Pipe Exit to Container	1/2"	15 mm	ExitCon	1,0000	1	1,0000		
										0,0000	1,0000
14	P14	Start of Pipe	Branch Tee	1/2"	15 mm	BT	1,6200	1	1,6200		
14	P14	End of Pipe	Ball Valve Reduced Bore	1/2"	15 mm	BallRB	2,6000	1	2,6000		
										1,6200	2,6000
15	P15	Start of Pipe	Standard Bend	1/2"	15 mm	SB	0,8100	1	0,8100		
15	P15	End of Pipe	Open Pipe Exit	1/2"	15 mm	Open	1,0000	1	1,0000		
										0,8100	1,0000
16	P16	Start of Pipe	Branch Tee	1/2"	15 mm	BT	1,6200	1	1,6200		
										1,6200	0,0000
17	P17	Start of Pipe	Through Tee	1/2"	15 mm	TT	0,5400	1	0,5400		
17	P17	End of Pipe	Pipe Exit to Container	1/2"	15 mm	ExitCon	1,0000	1	1,0000		
										0,5400	1,0000

Figura 39 Accesorios por tramo de tubería.

Node Data

Node Id	Node Type	Node	Elevation m	Liquid Level m	Surface Press. bar.g	Press. at Node bar.g	HGL at Node m.hd Fluid	Demand In (Mass) kg/sec	Demand Out (Mass) kg/sec	Demand In (Vol) @ Fluid Zone Density Downstream m ³ /sec	Demand Out (Vol) @ Fluid Zone Density Downstream m ³ /sec
1	Join Point	N1	0,450	N/A	N/A	0,0867	1,336	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	Tank	Tanque de reserva	0,100	0,300	0,0295	0,0589	0,701	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Join Point	N3	0,000	N/A	N/A	0,0477	0,487	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	Join Point	N4	0,000	N/A	N/A	-0,0724	-0,740	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	Join Point	N5	0,550	N/A	N/A	0,0678	1,243	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	Join Point	N6	0,750	N/A	N/A	0,0482	1,243	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	Tank	Tanque de control	0,400	0,340	0,0492	0,0825	1,243	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Join Point	N8	0,600	N/A	N/A	0,0365	0,973	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
9	Join Point	N9	0,450	N/A	N/A	0,0388	0,846	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	Join Point	N10	0,550	N/A	N/A	0,0276	0,832	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	Join Point	N11	0,600	N/A	N/A	0,0076	0,678	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	Demand Pressure	N12	0,550	N/A	0,0000	0,0000	0,550	N/A	N/A	N/A	N/A
13	Join Point	N13	0,600	N/A	N/A	0,0253	0,858	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
14	Demand Pressure	N14	0,600	N/A	0,0000	0,0000	0,600	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 40 Información de nodos en la simulación del sistema.

Energy Data

Pipe Id	Pipe Name	Energy Loss To Pipe Friction	Energy Loss To Pipe Fittings	Energy Loss To Pipe Components	Energy Loss To Pipe Control Valves	Energy Loss To Pump Inefficiency	SUBTOTAL Loss Pipe Items +Pump	Energy Loss To Discharge Pressure	Energy Loss To Change in Elevation	TOTAL USED Sum of All Items
		Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts	Kilowatts
1	P1	0,001060	0,002191	0,000000	0,000000	Efficiency Not Specified	0,003251	0,000000	0,002202	0,005453
2	P2	0,000236	0,000811	0,000000	0,000000	N/A	0,001047	0,000000	-0,000489	0,000558
3	P3	0,000471	0,005534	0,000000	0,000000	N/A	0,006006	0,000000	0,000000	0,006006
4	P4	0,000030	0,000188	0,000000	0,000000	N/A	0,000217	0,000000	0,000232	0,000450
5	P5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	0,000000	0,000000	0,000002	0,000002
6	P6	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	N/A	0,000000	0,000010	-0,000004	0,000006
7	P7	0,000543	0,001078	0,000000	0,000000	N/A	0,001620	0,000000	0,000843	0,002463
8	P8	0,000233	0,000793	0,000000	0,000000	N/A	0,001025	0,000000	0,000761	0,001786
9	P9	0,000053	0,000382	0,000000	0,000000	N/A	0,000435	0,000962	-0,000800	0,000597
10	P10	0,000078	0,001181	0,000000	0,000000	N/A	0,001260	0,000000	0,000000	0,001260
11	P11	0,000137	0,000235	0,000000	0,000000	N/A	0,000372	0,001545	-0,000899	0,001018
12	P12	0,000088	0,000862	0,000000	0,000000	N/A	0,000949	0,000000	0,000000	0,000949
13	P13	0,000131	0,000171	0,000000	0,000000	N/A	0,000303	0,001391	-0,001041	0,000653
14	P14	0,000026	0,000626	0,000000	0,000000	N/A	0,000651	0,000000	0,000000	0,000651
15	P15	0,000013	0,000268	0,000000	0,000000	N/A	0,000281	0,000000	-0,000110	0,000171
16	P16	0,000313	0,000299	0,000000	0,000000	N/A	0,000612	0,000000	0,000000	0,000612
17	P17	0,000155	0,000133	0,000000	0,000000	N/A	0,000289	0,001108	-0,000921	0,000476

Figura 41 Información de energía.

6.3 Anexo 3: Ficha técnica del tanque de referencia



PLASTANK
COLOMBIA LTDA.


FICHA TÉCNICA No. 09

Código: PCL REG.19

VERSIÓN: 04

TAMBOR CERRADO 60L. ASA NORMAL CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

*CERTIFICACIÓN UN
UN 1H1/Y1.3/100/2024*

REFERENCIA: TC 60..	
DESCRIPCIÓN GENÉRICA: Tambor cerrado con capacidad de 60 L (16 gal).	
PESO: 3.1Kg (+/- 0.5) (6.83 lb).	
ESPESOR PROMEDIO DE PARED: 3.0 mm (0.11" in) mínimo. 2.0 mm (0.075" in) en esquina mínimo.	
CAPACIDAD NOMINAL: 60 Litros 16 Galones. CAPACIDAD AL REBOSE: 63 Litros 16.6 Galones.	
DIMENSIONES: Diámetro 367 mm (+/-10) 14.4" in. Altura 685 mm (+/-10) 26.9" in.	
MATERIAL: Polietileno de Alta Densidad y Alto Peso Molecular.	
CARGA ESTÁTICA: Resiste una carga estática por 28 días sin deformación significativa estando con 60 L de agua a 25°C.	CAÍDA LIBRE: Resiste el impacto en caída libre a 2.1 m (6.89 ft) de altura sobre concreto, estando lleno de 60 L de agua a temperatura ambiente (debe soportar esta prueba al menos una vez).
ESTIBA: 9 tambores por estiba. NIVELES: 2 máximo.	
PRESIÓN HIDROSTÁTICA: El tambor TC 60 recibe una presión de 172 KPa (25 Psi) durante 30 min, con agua a 25°C.	INTEMPERISMO: Exposición a la intemperie por 1 año sin afectar las propiedades mecánicas. Se recomienda almacenar bajo techo.
COMPATIBILIDAD: El envase está manufacturado con polietileno de alta densidad (PEAD) haciéndolo compatible con una amplia variedad de productos. El usuario debe realizar pruebas de compatibilidad de su producto antes de envasar y distribuir. Las resinas utilizadas están aprobadas por la FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA) de los Estados Unidos de América.	
TEMPERATURA MÁXIMA DE LLENADO: 85°C máximo, sin someter el tambor a esfuerzo mecánico hasta que tenga temperatura ambiente.	
CIERRE: Dos tapones de 2.5" in de diámetro con rosca buttress.	
NOTA: Todas las pruebas de resistencia mecánicas, se realizan con el tambor herméticamente cerrado con 60 L de agua a una temperatura ambiente. Se debe utilizar las dos manijas o asas simultáneamente para trasladar o movilizar el envase con producto, sin superar una altura de 20 cm aproximadamente de la superficie o suelo. No se deberá manipular el envase con las horquillas del montacarga sujetándolo de las manijas o asas. Debido a nuestros procesos de mejora continua las especificaciones aquí descritas pueden ser cambiadas por el fabricante sin previo aviso.	

L=Litros gal=Galones Kg= Kilogramos lb= Libras mm= Milímetros m= Metros in= Pulgadas ft= Pies Kpa= N/m² Psi=lb/in² °C= celsius

Fecha de actualización: 04/Enero/2024

6.5 Anexo 4: Calculo de factor de seguridad del TK01

Datos Iniciales

Presión Interna del Tanque (Pint): 1.20 psi

Presión Externa (Pext): 0.101 MPa = 101000 Pa (Presión ATM)

Radio Interno del Tanque (r): 0.16 m

Espesor de la Pared (t): 2 mm = 0.002 m [Anexo 3]

Resistencia a la Tracción del HDPE (σ): Entre 20-28 Mpa (ISO 527) [n]

1. Cálculo de la Presión Interna

Teniendo en cuenta el estudio en Pipe Flow, la presión interna del tanque es de:

$$P_{int} = 1.20 \text{ psi} = 8273.71 \text{ Pa}$$

2. Cálculo de los Esfuerzos Tangenciales

Esfuerzo Tangencial Circunferencial (Hoop Stress):

$$\sigma_{\theta} = \frac{P * r}{t} \text{ (Ecuacion 8)}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1323.80 \text{ Pa}}{0.002 \text{ m}} = 0.662 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo Tangencial Longitudinal (Axial Stress):

$$\sigma_l = \frac{P * r}{2t} \text{ (Ecuacion 9)}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1323.80 \text{ Pa}}{0.004 \text{ m}} = 0.331 \text{ Mpa}$$

3. Cálculo del Factor de Seguridad

Resistencia a la Tracción del HDPE:

$$\sigma_{yield} = 24 - 28 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Máximo Aplicado:

Cálculo del Factor de Seguridad (FS):

Para el Esfuerzo Circunferencial ($\sigma\theta$):

$$FS_{min} = \frac{20 \text{ Mpa}}{0.662 \text{ Mpa}} = 30.21$$

$$FS_{max} = \frac{28}{0.662} = 42.27$$

Para el Esfuerzo Circunferencial (σ_L):

$$FS_{min} = \frac{20 \text{ Mpa}}{0.331 \text{ Mpa}} = 60.42$$

$$FS_{max} = \frac{28}{0.331} = 84.59$$

6.5 Anexo 5: Escala de % de llenado, para la simulación en Workbench.

Para interpretar que 6.28 mA representa un 30% de nivel de llenado en tu sistema, debes seguir un proceso de escalado lineal basado en la relación conocida entre la corriente (4-20 mA) y el porcentaje de llenado (0-100%).

Proceso de Escalado

1. Definir los puntos de referencia:

- 4 mA = 0% de llenado
- 6.28 mA = 30% de llenado

2. Determinar la ecuación de la recta que describe esta relación:

Utiliza la fórmula de la pendiente (m) y la intersección (b) de una línea recta:

$$y = mx + b \text{ (Ecuacion 11)}$$

Donde (y) es el porcentaje de llenado, y (x) es la corriente en mA.

3. Calcular la pendiente (m):

$$m = \frac{\Delta \text{Porcentaje}}{\Delta \text{Corriente}} = \frac{30\% - 0\%}{6.28 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = \frac{30}{2.28} = 13.16\%/\text{mA} \text{ (Ecuacion 12)}$$

4. Calcular la intersección (b):

$$b = 0\% - 13.16\% * 4 = 52.64\%$$

Ecuación de la Línea

Entonces, la relación entre la corriente y el porcentaje de llenado es:

$$\text{Porcentaje de llenado} = 13.16 * (\text{corriente en mA}) - 52.64 \text{ (Ecuacion 13)}$$

Aplicación de la Ecuación

Para 6.28 mA, aplica la ecuación:

$$\text{Porcentaje de llenado} = 13.16\%/\text{mA} * (6.28 \text{ mA}) - 52.64\%$$

$$\text{Porcentaje de llenado} = 30\%$$