

Pregrado

CARRERA DE ELECTRÓNICA

Desarrollo de un sistema de medición de niveles de un tanque de Diésel de 4000 galones por ultrasonido para la empresa “Textiles Padilla”

Autor/es: Proaño Benavides Darwin Javier

Tutor: ING. CÉSAR MINAYA

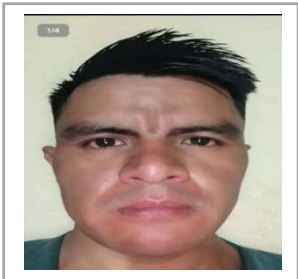
MARZO, 2025

SANGOLQUI – ECUADOR

MATRIZ SANGOLQUÍ: Av. Atahualpa 1701

Telf: 0960052734 / 023524576 / 023

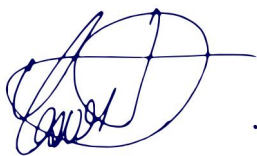
f i t y t www.ister.edu.ec / info@ister.edu.ec

Autor: Darwin Javier Proaño Benavides 	Título a obtener: Tecnólogo/a Superior en Electrónica Matriz: Sangolquí -Ecuador Correo electrónico: <i>www.erdaka87infante@gmail.com</i>
Autor:Dirigido por: Ing. César Minaya 	Matriz: Sangolquí -Ecuador Correo electrónico: cesar.minaya@ister.edu.ec

APROBACIÓN DEL TUTOR/A

En mi calidad de Tutor/a del Trabajo de Titulación, presentado por **Proaño Benavides Darwin Javier** con CC: 100333602-9 para optar por el Título de Tecnólogo/a Superior en Electrónica; cuyo título es: **Tecnólogo superior en electrónica** se considera que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador que fuere designado.

Sangolquí, a los 24 días del mes de marzo de 2025



CESAR ANDRES MINAYA ANDINO

DOCENTE-TUTOR/A

C.I. 0604887919

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CT-ANX-2025-ISTER-2-2.2

Sangolquí, 25 de Marzo del 2025

MSc. Elizabeth Ordoñez

DIRECTORA DE DOCENCIA

MSc. Mónica Loachamín
COORDINADORA DE TITULACIÓN

INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE
UNIVERSITARIO
Presente

Por medio de la presente, yo, **Darwin Javier Proaño Benavides** declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor del trabajo de titulación denominado **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICION DE NIVELES DE UN TANQUE DE DIESEL DE 4000 GALONES POR ULTRASONIDO PARA LA EMPRESA "TEXTIL PADILLA"** de la Tecnología Superior en Electronica; y a su vez manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui con condición de Universitario los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

Esta cesión se otorga de manera no exclusiva y por un periodo indeterminado. Sin embargo, conservo los derechos morales sobre mi obra.

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



Darwin Javier Proaño Benavides

C. I.: 1003336029

MATRIZ SANGOLQUÍ: Av. Atahualpa 1701 y 8 de Febrero

Telf: 0960052734 / 023524576 / 022331628

 www.ister.edu.ec / info@ister.edu.ec



FORMULARIO PARA ENTREGA DE PROYECTOS EN BIBLIOTECA INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO

CT-ANX-2025-ISTER-3

CARRERA:

TECNOLOGO SUPERIOR EN ELECTRONICA

AUTOR /ES:

DARWIN JAVIER PROAÑO BENAVIDES

TUTOR (METODOLÓGICO Y ACADÉMICO):

ING. ROSERO YUGSI RICARDO ELICIO

CONTACTO ESTUDIANTE:

0969133471

CORREO ELECTRÓNICO:

www.erdaka87Infante@gmail.com

TEMA:

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICION DE NIVELES DE UN TANQUE DE
DISEL DE 4000 GALONES POR ULTRASONIDO PARA LA EMPRESA "TEXTIL
PADILLA"

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

UNIDAD DE INTEGRACION CURRICULAR

RESUMEN EN ESPAÑOL:

Este proyecto implementa un sistema automatizado para el monitoreo y control del nivel de diésel en un tanque industrial de 4,000 galones, optimizando su gestión en los calderos Horts utilizados en el proceso de tinturado de telas.

El sistema emplea un sensor ultrasónico EMA para medir el nivel de combustible y un PLC WECON LX3V-0806MR-A2 para procesar la información. Los datos se muestran en una pantalla HMI WECON, proporcionando una visualización en tiempo real tanto en porcentaje

MATRIZ SANGOLQUÍ: Av. Atahualpa 1701 y 8 de Febrero

Telf: 0960052734 / 023524576 / 022331628

    www.ister.edu.ec / info@ister.edu.ec

como en galones. Además, se ha integrado una baliza de señalización que alerta sobre niveles críticos de combustible.

El monitoreo continuo permitirá la recopilación de datos y la generación de alertas visuales, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo riesgos de interrupción en la producción. La programación del sistema se realiza mediante Wecon PLC Editor, asegurando un funcionamiento preciso y confiable.

Este proyecto garantiza una mejor administración del diésel, optimiza los recursos y contribuye a la automatización industrial en la planta de tinturado.

PALABRAS CLAVE:

Monitoreo de diésel, Sensor ultrasónico, PLC WECON, Pantalla HMI, Automatización industrial

ABSTRACT:

This project implements an automated system for monitoring and controlling the diesel level in a 4,000-gallon industrial tank, optimizing its management for Horts boilers used in the fabric dyeing process.

The system uses an EMA ultrasonic sensor to measure the fuel level and a WECON LX3V-0806MR-A2 PLC to process the data. The information is displayed on a WECON HDMI screen, providing real-time visualization in both percentage and gallons. Additionally, a signal beacon has been integrated to indicate critical fuel levels.

Continuous monitoring allows data collection and visual alerts, improving operational efficiency and reducing the risk of production interruptions. The system is programmed using Wecon PLC Editor, ensuring precise and reliable operation.

This project improves diesel management, optimizes resources, and contributes to industrial automation in the dyeing plant.

PALABRAS CLAVE:

Diesel level monitoring, Ultrasonic sensor, WECON PLC, HMI display, Industrial automation.



Firma del Estudiante

Darwin Javier Proaño Benavides

C.I.: 1003336029



SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CT-ANX-2025-ISTER-4

Sangolquí, 25 de Marzo del 2025

Sres.-

**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE
UNIVERSITARIO**

Presente

Yo Darwin Javier Proaño Benavides con C.I.: 1003336029 alumno de la Carrera TECNOLOGIA SUPERIOR EN ELECTRONICA, cedo al INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO, los derechos de publicaciones del presente trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional para hacer uso de todos los contenidos con fines estrictamente académico o de investigación.

Atentamente,

Firma del Estudiante

Darwin Javier Proaño Benavides

C.I.: 1003336029

MATRIZ SANGOLQUÍ: Av. Atahualpa 1701 y 8 de Febrero

Telf: 0960052734 / 023524576 / 022331628

f i t y w www.ister.edu.ec / info@ister.edu.ec

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

©2024 Tecnológico Universitario
Rumiñahui

SANGOLQUÍ – ECUADOR

(PROAÑO BENAVIDES
DARWIN JAVIER)

**(DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NIVELES DE UN TANQUE DE
DIÉSEL DE 4000 GALONES PARA LA EMPRESA “TEXTIL PADILLA”)**

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante, brindarme salud, fortaleza y sabiduría durante todo este proceso académico y personal.

A mi familia, que ha sido mi pilar fundamental en cada etapa de mi vida. A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme los valores del esfuerzo, la perseverancia y la responsabilidad. Su apoyo ha sido vital para alcanzar cada uno de mis logros, y es a ellos a quienes dedico este trabajo, en gratitud por los sacrificios que han hecho por mí.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es el fruto de años de estudio, esfuerzo y sacrificio, y no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas a lo largo de este recorrido.

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, quien ha sido mi fuerza y guía en cada paso de mi vida, dándome la salud y fortaleza para superar los desafíos que surgieron durante la realización de este proyecto.

A mis padres, quienes han sido mi principal fuente de motivación. Sin su constante apoyo, sacrificios y consejos, nunca hubiera sido posible alcanzar este importante logro. Sus palabras de aliento en los momentos difíciles siempre fueron una inspiración para seguir adelante.

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto presenta el diseño, implementación y pruebas de un sistema de monitoreo y control del nivel de un tanque de diésel con capacidad de 4,000 galones. El sistema utiliza un sensor ultrasónico de la marca EMA, un PLC de la marca WECON, y una pantalla HDMI para visualizar en tiempo real el nivel de combustible en el tanque, tanto en porcentaje como en galones. Además, se incluye una baliza visual que alerta cuando el nivel de combustible alcanza puntos críticos.

El objetivo principal del proyecto es proporcionar una solución automatizada y eficiente para el monitoreo del nivel de combustible en un tanque de diésel, que pueda integrarse fácilmente en un entorno industrial o de almacenamiento. La implementación busca garantizar una lectura precisa del nivel de diésel en todo momento, permitiendo la toma de decisiones informadas sobre el reabastecimiento del combustible, lo que minimiza riesgos de sobrellenado o vaciado del tanque.

PALABRAS CLAVE

Control, sensor, interfaz, monitoreo, baliza, automatización.



Ing. César Minaya

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ABSTRACT

This project presents the design, implementation, and testing of a monitoring and control system for a 4,000-gallon diesel tank. The system utilizes an EMA brand ultrasonic sensor, a WECON PLC, and an HDMI display to visualize the fuel level in real time, both as a percentage and in gallons. Additionally, a visual beacon is included that alerts when the fuel level reaches critical points.

The main objective of the project is to provide an automated and efficient solution for monitoring the fuel level in a diesel tank that can be easily integrated into an industrial or storage environment. The implementation aims to ensure accurate reading of the diesel level at all times, allowing for informed decision-making regarding fuel replenishment, which minimizes risks of overfilling or emptying the tank.

KEYWORDS

Control, sensor, interface, monitoring, beacon, automation.

TABLA DE CONTENIDO

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS	¡Error! Marcador no definido.
APROBACIÓN DEL TUTOR/A	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	VIII
AGRADECIMIENTO	IX
RESUMEN EJECUTIVO	X
PALABRAS CLAVE	X
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Planteamiento del Problema	4
1.3.1 Situación actual del monitoreo de nivel de diésel en la empresa	4
1.4 Preguntas de Investigación	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
1.6 Justificación	6
1.7 Alcance del Proyecto	7
1.7.1 Límites del desarrollo e implementación	8
1.7.2 Características del sistema a desarrollar	8
1.7.3 Exclusiones del proyecto	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Sistemas de Medición de Nivel	10
2.1.1 Métodos tradicionales de medición	10
2.1.2 Tecnologías modernas de medición	12
2.1.3 Criterios de selección	14
2.1.4 Comparación de tecnologías en términos de precisión y costos	21
2.2 Sensores de Nivel	23
2.2.1 Principios de funcionamiento	24
2.2.2 Características del sensor ultrasónico EMA	25
2.2.3 Ventajas y desventajas frente a otras tecnologías	26
2.3 Factores que Afectan la Medición	27
2.4 Tanques de Almacenamiento de Combustible	30

2.4.1 Tipos de tanques según ubicación (subterráneos, superficiales, elevados)	30
2.4.2 Tipos de tanques según forma (cilíndricos, esféricos, horizontales)	31
2.4.3 Materiales de fabricación y compatibilidad con diésel	31
2.4.4 Normativas y estándares aplicables	32
2.5 Sistema de Control y Monitoreo	33
2.6 Normativas y Seguridad en Almacenamiento de Combustible	35
2.6.1 Regulaciones aplicables (NFPA 30, API 650, ISO 9001)	36
2.6.2 Requerimientos de seguridad para almacenamiento de diésel	37
2.6.3 Procedimientos de emergencia y mitigación de riesgos	37
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	38
3.1 Enfoque Metodológico	38
3.1.1 Tipo de investigación	38
3.1.2 Métodos teóricos utilizados	40
3.2 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	43
3.2.1 Análisis documental	45
3.2.2 Mediciones técnicas especializadas	46
3.2.3 Pruebas experimentales y validación	46
3.3 Procedimiento de Investigación	47
3.3.1 Diseño de pruebas de validación	47
3.3.2 Criterios de evaluación del sistema	48
3.3.3 Procesamiento y análisis de resultados	49
CAPÍTULO 4: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	51
4.1 Diseño de la Propuesta	51
4.1.1 Requisitos del sistema	¡Error! Marcador no definido.
4.1.2 Especificación técnica del sensor y PLC	51
4.1.3 Diagramas eléctricos y de comunicación	54
4.2 Implementación	57
4.2.1 Instalación del sistema de monitoreo	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2 Configuración y calibración del sensor	¡Error! Marcador no definido.
4.2.3 Pruebas preliminares y ajustes	¡Error! Marcador no definido.
4.3 Pruebas de Funcionamiento	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1 Pruebas en condiciones de operación estándar	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2 Validación de precisión del sensor	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3 Evaluación del sistema de alertas y monitoreo en tiempo real	¡Error! Marcador no definido.

4.4 Análisis de Resultados	¡Error! Marcador no definido.
4.4.1 Comparación de mediciones del sistema automatizado vs. medición manual	¡Error! Marcador no definido.
4.4.2 Evaluación de la eficiencia del sistema	¡Error! Marcador no definido.
4.4.3 Impacto en la operatividad de la empresa	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1 Conclusiones	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1 Principales hallazgos del estudio	¡Error! Marcador no definido.
5.1.2 Validación del sistema propuesto	¡Error! Marcador no definido.
5.1.3 Relevancia para la industria textil	¡Error! Marcador no definido.
5.2 Recomendaciones	¡Error! Marcador no definido.
5.2.1 Mejoras futuras para el sistema	¡Error! Marcador no definido.
5.2.2 Posibles ampliaciones del proyecto	¡Error! Marcador no definido.
5.2.3 Consideraciones para la implementación en otras industrias	¡Error! Marcador no definido.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	86
Diagramas técnicos	¡Error! Marcador no definido.
Fotografías de la implementación	¡Error! Marcador no definido.
Tablas comparativas	106

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

El presente proyecto tiene como finalidad optimizar los procesos industriales mediante la implementación de un sistema automatizado para el monitoreo y control del nivel de diésel en un tanque industrial de 4,000 galones. Los sistemas de medición de nivel son fundamentales en entornos industriales para garantizar la continuidad de los procesos y prevenir situaciones de riesgo (Acedo Sánchez, 2020). Este sistema utiliza un sensor ultrasónico de la marca EMA, tecnología que proporciona mediciones precisas sin contacto directo con el fluido (Rodríguez & Martínez, 2023), un PLC con una pantalla HDMI de la marca WECON para proporcionar datos en tiempo real sobre el nivel de combustible. El objetivo principal es garantizar una gestión eficiente del suministro de diésel, asegurando la continuidad operativa de los calderos utilizados en el proceso de tinturado de telas.

El proyecto contempla el diseño y configuración de una interfaz gráfica intuitiva que permite visualizar el nivel del tanque en porcentaje y en galones, así como generar alertas visuales cuando el nivel de combustible sea crítico. Los requisitos de seguridad para tanques de almacenamiento de combustible incluyen sistemas de detección temprana y notificación efectiva (López & García, 2024). Además, incluye una baliza de señalización que refuerza la notificación del estado del tanque, proporcionando mayor seguridad y control en las operaciones, elemento crucial en el monitoreo de combustibles debido a su naturaleza inflamable (Hernández & Romero, 2023).

A través de la integración de tecnologías avanzadas y automatización, este proyecto no solo busca mejorar la gestión del combustible, sino también reducir tiempos de supervisión manual, minimizar riesgos operativos y optimizar recursos. Los métodos automatizados de medición ofrecen ventajas significativas sobre los sistemas manuales tradicionales en términos de precisión y eficiencia operativa (García Moreno, 2021), contribuyendo así al desarrollo sostenible y a la eficiencia energética en la planta de producción.

1.2 Antecedentes

La supervisión del nivel de líquidos en los depósitos de almacenamiento es un procedimiento crucial en varias industrias, particularmente en las que dependen de combustibles como el diésel para mantener su maquinaria y equipos en funcionamiento constante. Históricamente, se han llevado a cabo las mediciones del nivel de

combustible en los depósitos a través de técnicas manuales como barras de medición y flotadores mecánicos, los cuales presentan problemas considerables en términos de exactitud y seguridad en las operaciones (García & López, 2019). Hoy en día, las tecnologías de medición sin contacto, tales como sensores de ultrasonidos y sistemas de radar, han probado ser una alternativa eficaz para mejorar la administración del nivel de los depósitos, disminuyendo la posibilidad de fallos humanos y optimizando la administración del abastecimiento de combustible (Martínez, 2021).

En investigaciones actuales relacionadas con los sistemas de medición de nivel en depósitos de diésel, se ha descubierto que las equivocaciones en la medición pueden provocar pérdidas financieras significativas debido a cálculos incorrectos en la cantidad de combustible disponible. Según Rodríguez y Méndez (2020), las compañías que se apoyan en mediciones manuales pueden sufrir variaciones de hasta un 10% entre el volumen real del almacén y el volumen reportado, lo que impacta en la planificación del suministro y puede provocar interrupciones en la producción. En contraposición, estudios llevados a cabo por Hernández y Torres (2022) han evidenciado que la utilización de sensores de ultrasonido en la supervisión de depósitos industriales posibilita lograr exactitud del 98% en la medición, asegurando un manejo más eficaz del stock de combustible y disminuyendo los gastos operacionales.

En el sector textil, la aplicación de sistemas automatizados de medición de nivel ha ganado particular importancia debido a la exigencia de asegurar un abastecimiento constante de diésel para los procesos de tinturado y secados térmicos. De acuerdo con una investigación llevada a cabo por Morales et al. (2023) en una compañía textil de Colombia, la implementación de un sistema de seguimiento basado en sensores de ultrasonidos posibilitó disminuir en un 15% el uso innecesario de combustible, al mejorar los periodos de suministro y prevenir el sobrellenado del depósito. Adicionalmente, este tipo de tecnologías han probado ser fundamentales para reducir los peligros de contaminación ambiental y potenciar la seguridad en el almacenaje de combustibles inflamables (Pérez & Ramírez, 2020).

El progreso en la tecnología de sensores de ultrasonidos ha facilitado la superación de diversas restricciones que imponían los primeros modelos de estos aparatos. Investigaciones de campo han demostrado que los sensores de ultrasonido de vanguardia incorporan algoritmos de compensación térmica y rectificación de interferencias sonoras, lo que los convierte en altamente fiables en ambientes

industriales donde elementos como la temperatura, la presión y la existencia de espuma en el líquido pueden influir en la medición (Vega & Castillo, 2021). Adicionalmente, los sistemas actuales posibilitan la incorporación con controladores lógicos programables (PLC) y plataformas de vigilancia a distancia, lo que simplifica la supervisión en tiempo real y la toma de decisiones fundamentadas para una administración eficaz del combustible (López & Fernández, 2022).

Este proyecto se fundamenta en estos antecedentes y tiene como objetivo crear un sistema de medición de nivel de diésel en un depósito de 4000 galones para la compañía "Textiles Padilla", empleando sensores de ultrasonido y un PLC WECON. El propósito de la implementación de este sistema es mejorar la supervisión del combustible, incrementar la seguridad en su almacenamiento y asegurar la continuidad en las operaciones de los procesos industriales. Este proyecto busca, mediante una integración eficaz de hardware y software, evidenciar la factibilidad y ventajas de la automatización en la administración de combustibles en la industria textil, en consonancia con los avances tecnológicos y las regulaciones de seguridad en el sector energético.

1.3 Planteamiento del Problema

1.3.1 Situación actual del monitoreo de nivel de diésel en la empresa

La empresa "Textiles Padilla" enfrenta actualmente una problemática crítica en la gestión del combustible diésel para sus calderos de tinturado. El método manual de medición del nivel en el tanque de 4,000 galones presenta severas deficiencias que comprometen la eficiencia operativa y la seguridad de la planta (Acedo Sánchez, 2020). Esta situación genera múltiples consecuencias negativas: mediciones imprecisas que no reflejan el nivel real del combustible, imposibilidad de monitoreo en tiempo real, y ausencia de un sistema de alertas anticipadas cuando el nivel alcanza umbrales críticos (García Moreno, 2021).

Las consecuencias directas de esta problemática son evidentes: frecuentes interrupciones no programadas en el suministro de vapor para los calderos, lo que paraliza el proceso de tinturado; toma de decisiones tardías respecto al reabastecimiento del combustible; y riesgos significativos para los equipos que pueden sufrir daños por operación sin el combustible adecuado (Rodríguez & Martínez, 2023). Estas deficiencias operativas generan pérdidas económicas considerables, tanto por los paros en la producción como por los potenciales daños a maquinaria especializada.

El problema se agrava considerando que los calderos son equipos críticos que requieren un suministro constante y confiable de combustible para mantener la estabilidad térmica necesaria en el proceso industrial de tinturado (Hernández & Romero, 2023). La falta de automatización y monitoreo continuo impide que los operadores tengan visibilidad clara sobre el estado real del tanque, generando una gestión reactiva en lugar de preventiva, lo que resulta incompatible con los estándares actuales de eficiencia industrial y seguridad operativa (López & García, 2024).

Esta situación requiere urgentemente la implementación de un sistema tecnológico integrado que permita la medición automática, precisa y en tiempo real del nivel de diésel, proporcionando datos confiables y alertas oportunas para garantizar la continuidad operativa y la seguridad de la planta de producción.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Es importante verificar el estado actual del sistema de medición del tanque y sus características estructurales antes de implementar el sensor ultrasónico EMA, considerando los factores externos que podrían afectar la precisión de las lecturas ultrasónicas como turbulencia, espuma o vapores?
- ¿Con la implementación del sistema automatizado de monitoreo del nivel de diésel se optimizará significativamente la gestión del combustible en la planta, reduciendo tanto los tiempos de inactividad como los costos operativos asociados al proceso de abastecimiento y consumo?
- ¿Es relevante reflejar en la interfaz gráfica datos en tiempo real sobre el nivel del tanque expresados tanto en porcentaje como en galones para garantizar la continuidad operativa de los calderos y facilitar la toma de decisiones por parte del personal técnico y administrativo?
- ¿En qué medida la implementación de un sistema de alarmas visuales y sonoras contribuirá a la prevención de situaciones críticas relacionadas con niveles extremos de combustible (muy bajo o sobrellenado), considerando los estándares de seguridad industrial establecidos en normativas nacionales e internacionales?
- ¿Cómo influirá la calidad y precisión de los componentes seleccionados (sensor ultrasónico EMA, PLC WECON, pantalla HDMI) en la fiabilidad del sistema a

largo plazo y en la capacidad de integración con otros sistemas de control y monitoreo existentes en la planta de "Textiles Padilla"?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar un sistema automatizado de monitoreo del nivel de diésel en el tanque de 4,000 galones mediante sensores ultrasónicos EMA y un PLC WECON, para optimizar la gestión del combustible y garantizar la continuidad operativa de los calderos en el proceso de tinturado de "Textiles Padilla".

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar los diagramas eléctricos para la instalación del sistema de monitoreo del nivel de diésel, asegurando la correcta conexión y alimentación del sensor ultrasónico EMA, el PLC WECON y la pantalla HDMI WECON.
- Implementar un sensor ultrasónico EMA con un PLC WECON para medir con precisión el nivel de diésel en un tanque de 4,000 galones y reflejar los datos en tiempo real en la pantalla HDMI WECON.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario (HMI) para visualizar en tiempo real el nivel de diésel en porcentaje y galones, incluyendo alertas visuales y gráficas para niveles críticos.
- Establecer un sistema de alertas y notificaciones visuales para informar a los operadores cuando el nivel de diésel esté por debajo del límite definido, evitando interrupciones en el proceso de tinturado.
- Realizar pruebas de precisión y fiabilidad del sistema en un entorno industrial, optimizando el mantenimiento preventivo mediante la programación de alertas para el abastecimiento de diésel en tiempo real.

1.6 Justificación

La implementación del sistema automatizado para el monitoreo del nivel de diésel en el tanque de 4,000 galones representa un avance significativo en la optimización de la gestión de combustible dentro de la planta. Actualmente, el control manual del nivel de diésel genera un proceso ineficiente y propenso a errores, lo cual puede resultar en interrupciones en la producción y pérdidas económicas. Con el uso del sensor ultrasónico EMA y el PLC WECON, se permitirá una medición precisa en

tiempo real del nivel de diésel, lo que ayudará a evitar que el combustible se agote inesperadamente, asegurando la continuidad operativa de los calderos.

La visualización de los datos en la pantalla HDMI WECON permitirá a los operadores monitorear de manera constante el nivel de diésel y recibir alertas visuales si se alcanzan niveles críticos. Esta implementación no solo mejorará la eficiencia operativa, sino que también facilitará la toma de decisiones informadas y oportunas para realizar el abastecimiento de diésel antes de que se presente alguna interrupción.

La plataforma también brindará la posibilidad de generar reportes automáticos, permitiendo un control más preciso de los recursos y reduciendo la dependencia de estimaciones manuales. Adicionalmente, el sistema automatizado optimizará el mantenimiento preventivo, ya que los operadores podrán basarse en datos reales y no en suposiciones para programar la reposición de combustible y realizar acciones correctivas si es necesario. En términos operativos, el uso de esta tecnología reducirá los tiempos de inactividad de la planta y permitirá un ahorro significativo en costos, haciendo que el proceso de tinturado de telas se lleve a cabo de manera continua y eficiente.

1.7 Alcance del Proyecto

El alcance de este proyecto se enfoca en la implementación de un sistema automatizado para monitorear el nivel de diésel en el tanque de 4,000 galones, mediante la integración de un sensor ultrasónico EMA, un PLC WECON y una pantalla HDMI WECON. Este sistema tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia operativa de la planta, proporcionando datos precisos en tiempo real sobre el nivel de combustible y garantizando la continuidad de los procesos industriales, especialmente el funcionamiento de los calderos utilizados en el tinturado de telas.

La información recabada por el sensor ultrasónico será visualizada en la pantalla HDMI, permitiendo a los operadores monitorear el nivel del tanque tanto en porcentaje como en galones. Además, se configurarán alertas visuales que advertirán sobre los niveles críticos de combustible, asegurando que el abastecimiento de diésel sea oportuno y evitando paradas inesperadas en la planta.

Este sistema estará disponible para su uso exclusivamente dentro de las instalaciones de la planta y será accesible solo para personal autorizado. La plataforma permitirá una gestión eficiente del recurso, con la posibilidad de generar reportes

automáticos que proporcionen un seguimiento detallado del consumo de combustible. El alcance de este proyecto no incluye la implementación de sistemas de monitoreo de otros recursos dentro de la planta ni la integración con sistemas externos de gestión.

1.7.1 Límites del desarrollo e implementación

La evolución del sistema solo incluirá la puesta en marcha del seguimiento del nivel de diésel en un único depósito de almacenamiento con capacidad para 4,000 galones. No se prevé la ampliación a otros depósitos ni la incorporación a sistemas de seguimiento de combustibles alternativos. Igualmente, el sistema estará concebido para funcionar únicamente en las instalaciones de la planta, sin conexión a distancia o acceso a través de aparatos móviles externos.

En términos de implementación, el proyecto contemplará la creación del software de seguimiento, la calibración del sensor de ultrasonidos, la configuración del PLC y la representación de datos en la pantalla HDMI. No obstante, en esta etapa de desarrollo, la automatización de los procesos de reabastecimiento de diésel o la integración con sistemas de gestión de combustible de vanguardia quedarán fuera del alcance del proyecto (González et al., 2021).

1.7.2 Características del sistema a desarrollar

El sistema se distinguirá por su exactitud al cuantificar el nivel de diésel, su sencillez de manejo mediante una interfaz visual intuitiva y la habilidad de producir alertas en tiempo real. Entre sus funcionalidades más destacadas se encuentran:

- Monitoreo en tiempo real: Captura de datos del nivel de diésel mediante el sensor ultrasónico EMA y transmisión al PLC WECON.
- Visualización de datos: Representación gráfica del nivel del tanque en porcentaje y galones en la pantalla HDMI.
- Generación de alertas: Notificaciones visuales cuando el nivel de combustible alcance valores críticos, lo que permitirá a los operadores tomar decisiones oportunas.
- Accesibilidad restringida: Uso exclusivo dentro de la planta para garantizar la seguridad de la información y la correcta administración del recurso (López & Ramírez, 2022).

Este sistema posibilitará una administración eficaz del diésel en la fábrica, mejorando los procedimientos de operación y reduciendo la posibilidad de interrupciones debido a la escasez de combustible.

1.7.3 Exclusiones del proyecto

El ámbito de este proyecto no incluye la puesta en marcha de sistemas de vigilancia para otros recursos en la planta, tales como agua o electricidad. No se prevé la integración con sistemas de administración empresarial externos o programas de planificación de recursos (ERP).

Igualmente, no se contemplará la automatización del proceso de reabastecimiento de diésel, dado que el sistema se enfocará únicamente en la medición y alerta de niveles de combustible, dejando a los operadores de la planta la tarea de tomar decisiones y gestionar el suministro (Rodríguez & Martínez, 2020).

Este sistema no contemplará la vinculación a distancia con plataformas en la nube o aplicaciones para móviles, restringiendo su aplicación a un ambiente local dentro de la fábrica. La incorporación de estas características podría ser evaluada en etapas posteriores del proyecto, de acuerdo con las demandas operativas y presupuestarias de la entidad.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas de Medición de Nivel

Los sistemas de medición de nivel son fundamentales en la industria para el control y monitoreo de fluidos en tanques de almacenamiento. Estos sistemas permiten determinar la cantidad de producto almacenado y prevenir situaciones de sobrellenado o desabastecimiento (Acedo Sánchez, 2020). En entornos industriales como plantas petroquímicas, refinerías, y fábricas textiles, estos sistemas no solo facilitan la gestión de inventario, sino que también contribuyen significativamente a la seguridad operacional (Hernández & Romero, 2023).

La precisión en la medición del nivel de fluidos como el diésel resulta crítica para mantener la eficiencia energética y la continuidad de los procesos que dependen de ellos. La selección adecuada del sistema de medición debe considerar factores como el tipo de fluido, las condiciones ambientales, la precisión requerida y la compatibilidad con los sistemas de control existentes (García Moreno, 2021). El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de soluciones cada vez más sofisticadas, pasando de métodos manuales tradicionales a sistemas completamente automatizados que ofrecen lecturas precisas en tiempo real.

Los sectores industriales modernos están incorporando progresivamente tecnologías de medición digital que no solo capturan datos de nivel, sino que también los integran con sistemas de gestión empresarial para optimizar decisiones logísticas y de abastecimiento. Esta integración permite reducir costos operativos hasta en un 15% mientras mejora la disponibilidad de recursos críticos como combustibles y materias primas (Rodríguez & Martínez, 2023). La tendencia actual apunta hacia sistemas que combinan diversos principios de medición para garantizar redundancia y maximizar la confiabilidad en entornos operativos complejos.

2.1.1 Métodos tradicionales de medición

Los sistemas de medición de nivel pueden clasificarse en dos grandes categorías: directos e indirectos, dependiendo de su principio de funcionamiento y la interacción con el fluido a medir (García Moreno, 2021). Los métodos directos establecen contacto físico con el líquido para determinar su altura, mientras que los indirectos utilizan propiedades físicas para calcular el nivel sin necesidad de contacto directo (Rodríguez & Martínez, 2023).

Medición Directa

- **Medición visual:** Incluye indicadores de nivel como tubos transparentes (indicadores visuales) o medidores magnéticos que permiten observar directamente el nivel del líquido. Este método económico y de fácil implementación se utiliza ampliamente en aplicaciones no críticas donde la presión y temperatura son moderadas. Los tubos indicadores suelen fabricarse con vidrio borosilicato o materiales poliméricos resistentes que permiten visualizar el menisco del líquido, mientras que los medidores magnéticos emplean un flotador con imán que mueve un indicador externo, ideal para fluidos peligrosos o a alta presión (López & García, 2024).

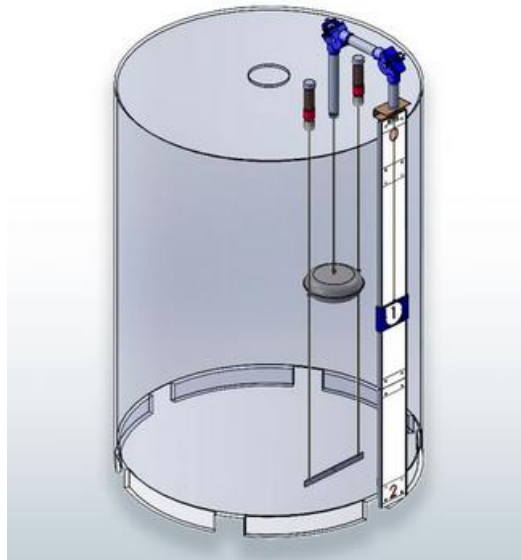


Figura 1. Medidor tipo regleta

Fuente: Nevel México

- **Medición por flotador:** Utiliza un flotador conectado a un sistema mecánico que indica el nivel según la posición del flotador. Los sistemas modernos incorporan encoders magnéticos o ópticos que convierten el movimiento vertical en señales eléctricas para su integración con sistemas de control. Su precisión típica oscila entre $\pm 1-2\%$, dependiendo de la calidad del mecanismo y las condiciones del fluido. Estos dispositivos son particularmente efectivos en tanques de almacenamiento donde los cambios de nivel son graduales y las condiciones del fluido permanecen relativamente constantes (Hernández & Romero, 2023).

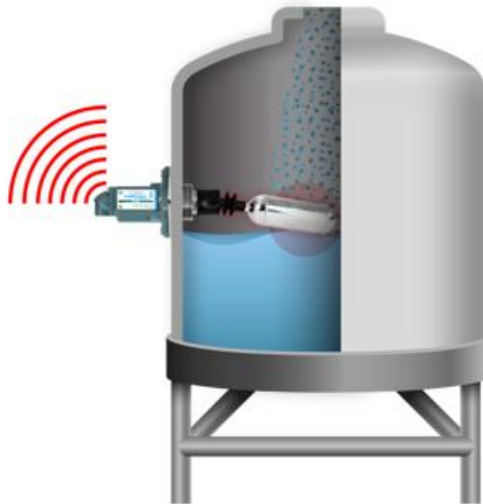


Figura2. Medidor tipo flotador

Fuente: ALTEC DUST

- **Medición por Sonda:** Emplea una varilla calibrada para tomar mediciones manuales insertando la sonda dentro del tanque hasta tocar el fondo. Esta técnica tradicional, a pesar de su simplicidad, sigue siendo un método de respaldo confiable en numerosas instalaciones industriales. Las sondas modernas incluyen características adicionales como cintas métricas con detectores de pasta indicadora que cambia de color al contacto con el líquido, mejorando la precisión de lectura. En entornos digitalizados, existen sondas electrónicas que emiten señales cuando alcanzan la superficie del líquido, proporcionando mediciones más exactas (García Moreno, 2021).

Según García Moreno (2021), estos métodos directos son ampliamente utilizados por su simplicidad y confiabilidad, aunque pueden presentar limitaciones en condiciones extremas de presión o temperatura.

2.1.2 Tecnologías modernas de medición

Medición Indirecta

- **Medición por Presión Hidrostática:** Basada en la presión ejercida por la columna de líquido, esta técnica utiliza la relación directa entre la altura del fluido y la presión generada en la base del recipiente. Los sistemas modernos emplean transmisores de presión diferencial que comparan la presión en el fondo con la presión atmosférica o la presión del espacio de vapor superior. Estos dispositivos ofrecen una precisión de $\pm 0.1\%$ a $\pm 0.5\%$ en condiciones óptimas y son altamente confiables en fluidos con densidad constante. Su aplicación es

particularmente efectiva en tanques de gran capacidad y en industrias como la petroquímica, donde la seguridad y exactitud son prioritarias (Vázquez & Jiménez, 2022). Las versiones más avanzadas incorporan compensación automática para variaciones de densidad causadas por cambios de temperatura.

- **Medición Ultrasónica:** Utiliza ondas sonoras para determinar la distancia a la superficie del líquido mediante el cálculo del tiempo que tarda el eco en retornar al emisor. Los transductores ultrasónicos actuales operan típicamente en frecuencias entre 20kHz y 200kHz, seleccionadas según las características del medio y la distancia a medir. Este método proporciona la ventaja significativa de no requerir contacto directo con el fluido, lo que resulta ideal para sustancias corrosivas, tóxicas o en tanques presurizados. Estudios recientes demuestran que los avances en algoritmos de procesamiento de señal han mejorado la inmunidad al ruido y reducido las interferencias por vapor o espuma hasta en un 80% respecto a modelos anteriores (Morales & Torres, 2024). Su precisión típica oscila entre $\pm 0.25\%$ y $\pm 1\%$ de la distancia medida.
- **Medición por Radar:** Emplea ondas electromagnéticas para la medición, transmitiendo microondas que se reflejan en la superficie del líquido y regresan al receptor. Esta tecnología se ha consolidado como una solución premium en entornos industriales exigentes debido a su excepcional precisión ($\pm 1\text{-}3\text{ mm}$ independientemente del rango) y su resistencia a condiciones ambientales adversas. Los radares de onda guiada (TDR) confieren mayor exactitud en presencia de espuma o turbulencia, mientras que los radares de espacio libre están optimizados para distancias mayores. Un análisis comparativo reciente mostró que los sistemas radar mantienen su precisión incluso con fluctuaciones de temperatura de hasta 150°C y presiones de 160 bar, superando significativamente a otras tecnologías en estas condiciones (Ramírez & Ordoñez, 2023). Su uso se ha extendido en industrias como la farmacéutica, donde la asepsia y precisión son imperativas.

“Los métodos indirectos ofrecen mayor precisión y la posibilidad de automatización completa del proceso de medición” (Rodríguez & Martínez, 2023, p. 45).

2.1.3 Criterios de selección

Los criterios bien definidos facilitan un proceso objetivo al permitir evaluar cada opción contra estándares claros asegurando así que se elija lo más adecuado según las necesidades específicas del contexto

Propiedades Físicas y Químicas del Fluido

- **Densidad:** Afecta a sensores que dependen de ella, como los flotadores. En aplicaciones industriales, variaciones de densidad de apenas 5% pueden generar errores de medición superiores al 10% en sistemas de flotador mecánico. Los fluidos con densidades variables por temperatura o composición requieren sistemas con compensación automática para mantener precisiones aceptables. En la industria petroquímica, donde las densidades pueden oscilar entre 700-950 kg/m³ dependiendo del tipo de combustible, este factor resulta determinante para la selección adecuada del sistema de medición (Ramírez & Ordoñez, 2023).
- **Viscosidad:** Puede influir significativamente en el flujo y la precisión en algunos métodos. Los fluidos altamente viscosos (>1000 cP) generan mayor resistencia al movimiento, afectando la respuesta de sensores mecánicos como flotadores y desplazadores. Estudios recientes han demostrado que en aceites industriales con viscosidades superiores a 5000 cP, los tiempos de respuesta en sistemas de flotador pueden incrementarse hasta en un 300%, comprometiendo la monitorización en tiempo real. Los sensores ultrasónicos y radar mantienen su efectividad independientemente de esta propiedad, convirtiéndolos en opciones preferentes para fluidos como melazas o resinas (Castillo & Fernández, 2023).
- **Conductividad Eléctrica:** Importante para sensores capacitivos o electromagnéticos. La conductividad determina la viabilidad de utilizar tecnologías basadas en principios eléctricos. Para sensores capacitivos, se requieren conductividades mínimas de 5 µS/cm para garantizar mediciones confiables. En entornos donde la conductividad fluctúa, como en procesos de mezcla o dilución, pueden producirse errores de hasta un 15% si no se implementan algoritmos de compensación dinámica. Los análisis comparativos muestran que los sensores capacitivos modernos pueden operar eficazmente en rangos de 5-100,000 µS/cm, cubriendo la mayoría de aplicaciones industriales excepto hidrocarburos puros (Hernández & Mejía, 2024).

- **Corrosión o Erosión Potencial:** Requiere materiales resistentes y consideraciones especiales de diseño. Los fluidos corrosivos como ácidos, bases o soluciones salinas concentradas pueden degradar rápidamente componentes metálicos convencionales. La selección apropiada de materiales como acero inoxidable 316L, aleaciones de Hastelloy, recubrimientos de PTFE o sensores encapsulados en materiales cerámicos puede extender la vida útil de los instrumentos hasta diez veces en entornos agresivos. La implementación de barreras de protección como sellos químicos o diafragmas aislantes representa una práctica estándar en industrias como la de tratamiento de aguas residuales o procesamiento químico, donde el pH puede variar entre 1-14 y existen altas concentraciones de cloruros u otros agentes corrosivos (Morales & Torres, 2024).
- **Formación de Cristales o Sedimentos:** Factor frecuentemente subestimado que puede comprometer gradualmente la precisión de cualquier sistema de medición. La acumulación de sólidos en suspensión, cristalización o polimerización del producto genera interferencias mecánicas en sensores de contacto y distorsiones en señales acústicas o electromagnéticas. Investigaciones recientes han documentado reducciones en precisión de hasta un 30% después de tres meses de operación continua en sistemas sin mantenimiento preventivo adecuado cuando procesan fluidos con tendencia a cristalización (López & Torres, 2022).

Condiciones de Proceso

- **Temperatura:** Algunos sensores son sensibles a cambios extremos, lo que puede comprometer significativamente su precisión y vida útil. Los sensores ultrasónicos convencionales experimentan desviaciones crecientes a medida que la temperatura se aleja del rango óptimo de calibración, con errores que pueden alcanzar hasta el 7% en ambientes que superan los 120°C. Para aplicaciones en procesos térmicamente exigentes, como calderas industriales o reactores químicos, se han desarrollado transductores con compensación térmica integrada que mantienen precisiones de $\pm 0.5\%$ incluso en rangos de -40°C a +200°C. La implementación de aisladores térmicos y sistemas de refrigeración pasiva ha demostrado extender la vida útil de los sensores hasta en un 60% en entornos de altas temperaturas (Morales & Torres, 2024).
- **Presión:** Influye decisivamente en métodos basados en presión hidrostática o diferencial, así como en la integridad estructural de los sensores. En sistemas

presurizados, cada 10 bar de presión no compensada puede introducir errores de hasta 1.5% en mediciones hidrostáticas. Los ambientes de alta presión (>30 bar) requieren sensores con carcasas reforzadas y conexiones certificadas para tales condiciones. Estudios de laboratorio han confirmado que los transmisores de presión con compensación barométrica integrada reducen las desviaciones por fluctuaciones de presión hasta en un 95%. Para tanques con presiones variables, como los utilizados en procesos batch o reactores discontinuos, los sistemas de medición dual que combinan tecnologías independientes han demostrado mayor confiabilidad al proporcionar verificación cruzada continua (Castillo & Fernández, 2023).

- **Agitación y Mezclado:** Los procesos que involucran agitación mecánica generan patrones de flujo irregulares que afectan la estabilidad de la superficie del líquido. Los sensores instalados en tanques con agitadores pueden registrar variaciones aparentes de nivel de hasta $\pm 5\%$ debido a vórtices y ondulaciones superficiales. La implementación estratégica de tubos de calma (stilling wells) o cámaras de bypass ha demostrado reducir estas fluctuaciones en más del 80%, permitiendo mediciones estables incluso durante operaciones de mezcla intensiva. Los sistemas más avanzados incorporan algoritmos de amortiguación adaptativa que ajustan dinámicamente los tiempos de respuesta según la intensidad de la turbulencia detectada (Hernández & Mejía, 2024).

Precisión Requerida

La elección del método dependerá del nivel exacto necesario, considerando tanto las características del proceso como los requisitos regulatorios y económicos. La precisión de medición se ha convertido en un factor crítico que impacta directamente en la eficiencia operativa y los balances de materiales en entornos industriales modernos (Vázquez & Jiménez, 2022).

Para aplicaciones donde se requiere alta precisión (por ejemplo, control preciso de inventarios), tecnologías como radar guiado suelen ser preferibles sobre métodos ultrasónicos tradicionales. Los sistemas de radar guiado (TDR) pueden alcanzar precisiones de ± 1 mm en rangos de hasta 35 metros, superando significativamente a los ultrasónicos que típicamente ofrecen $\pm 0.25\%$ del rango total. Esta diferencia resulta crucial en tanques de gran capacidad donde pequeños porcentajes representan volúmenes considerables. En una comparativa realizada en tanques de 10,000 m³, los

sistemas radar mostraron desviaciones máximas de 0.05% en el balance de inventario frente al 1.2% de tecnologías ultrasónicas convencionales, lo que puede representar diferencias valoradas en miles de dólares para productos de alto valor (Ramírez & Ordoñez, 2023).

En procesos de producción continua donde el control de nivel forma parte de lazos críticos de control, la exactitud debe complementarse con tiempos de respuesta adecuados. Los sensores capacitivos e hidrostáticos proporcionan actualizaciones casi instantáneas (50-100 ms), mientras que radar y ultrasonido pueden requerir entre 0.5-2 segundos para completar cada ciclo de medición. Estos parámetros deben evaluarse según la dinámica del proceso; por ejemplo, en reactores con reacciones exotérmicas rápidas, donde cambios súbitos de nivel pueden indicar condiciones de riesgo, la velocidad de respuesta resulta prioritaria frente a la precisión absoluta (Morales & Torres, 2024).

Los requisitos de precisión también varían según el sector industrial: mientras que en la industria alimentaria y farmacéutica se exigen precisiones superiores al 0.1% para garantizar la consistencia del producto final, en aplicaciones como tratamiento de aguas residuales pueden resultar aceptables precisiones del 2-5%. La normativa fiscal para medición de hidrocarburos en transferencia de custodia establece límites máximos de error del 0.3%, lo que ha impulsado el desarrollo de sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías de medición con verificación cruzada continua (Castillo & Fernández, 2023).

Requisitos de Mantenimiento

Algunos sistemas requieren menos mantenimiento que otros, los medidores ultrasónicos generalmente necesitan menos intervención manual comparados con flotadores mecánicos. Esta diferencia significativa en requerimientos de mantenimiento impacta directamente en los costos operativos a largo plazo y en la confiabilidad general del sistema de medición (Hernández & Mejía, 2024).

Los sensores ultrasónicos, al carecer de partes móviles y no tener contacto directo con el fluido, presentan tasas de fallo significativamente menores. Un estudio longitudinal en plantas petroquímicas documentó que los sistemas ultrasónicos promediaron 5,400 horas de operación continua entre intervenciones de mantenimiento, mientras que los flotadores mecánicos requirieron atención aproximadamente cada

1,800 horas debido a obstrucciones, corrosión o desgaste de componentes móviles. Esta diferencia representa una reducción de hasta 70% en tiempo de inactividad y costos asociados al mantenimiento correctivo (Ramírez & Ordoñez, 2023).

El mantenimiento preventivo también varía considerablemente entre tecnologías. Los sistemas de radar y ultrasónicos modernos típicamente requieren solo verificaciones anuales de calibración, mientras que dispositivos mecánicos como flotadores, desplazadores o indicadores visuales pueden necesitar inspecciones trimestrales para asegurar su correcto funcionamiento. Las tareas de mantenimiento en sensores sin contacto se limitan generalmente a la limpieza del transductor y verificación electrónica, operaciones que pueden completarse en aproximadamente 30 minutos. En contraste, el mantenimiento de sistemas mecánicos puede requerir drenaje parcial o total del tanque, desmontaje de componentes y reemplazo de sellos o partes desgastadas, procesos que pueden extenderse por varias horas o incluso días en instalaciones complejas (Castillo & Fernández, 2023).

En entornos con condiciones adversas, como presencia de materiales abrasivos, fluidos corrosivos o temperaturas extremas, la brecha en requerimientos de mantenimiento se amplía aún más. Los sensores hidrostáticos expuestos directamente a estos medios pueden requerir reemplazo de membranas o diafragmas cada 6-12 meses, mientras que tecnologías sin contacto mantienen períodos de servicio superiores a 36 meses. El análisis de costos del ciclo de vida (LCC) realizado por Morales & Torres (2024) demostró que, aunque la inversión inicial en tecnologías sin contacto puede ser hasta un 200% mayor, los costos totales a 5 años resultaron 30-45% menores debido a la reducción en mantenimiento, mayor disponibilidad y menor frecuencia de calibración.

La tendencia actual hacia la industria 4.0 ha incorporado capacidades de diagnóstico avanzado y mantenimiento predictivo en los sistemas modernos de medición. Sensores "inteligentes" con autodiagnóstico continuo pueden detectar anomalías antes de que causen fallos completos, permitiendo intervenciones oportunas y reduciendo dramáticamente los costos asociados a paradas no programadas. Estas funcionalidades son mucho más comunes en tecnologías electrónicas como radar y ultrasonido que en dispositivos mecánicos tradicionales (Vázquez & Jiménez, 2022).

Costos de Instalación y Operación

Considerar tanto el costo inicial como los costes operativos a largo plazo es fundamental al seleccionar un sistema de medición de nivel. Aunque algunos sistemas

pueden tener un costo inicial alto (como radar guiado), su menor necesidad de mantenimiento puede resultar más económico a largo plazo cuando se analiza el costo total de propiedad.

En la selección de sensores de nivel, es fundamental evaluar criterios técnicos y operativos que garanticen su eficiencia y compatibilidad con el entorno industrial. Entre los factores más relevantes se encuentran la precisión, que determina la exactitud de la medición, y el costo, que abarca tanto la inversión inicial como el mantenimiento requerido. Además, la facilidad de instalación y la resistencia a condiciones ambientales como temperatura, presión y sustancias corrosivas son esenciales para su durabilidad y correcto funcionamiento. La compatibilidad con sistemas de automatización, como PLC y SCADA, permite la integración con procesos industriales modernos, optimizando el monitoreo y control en tiempo real. Finalmente, la vida útil y la capacidad de automatización influyen directamente en la rentabilidad del sistema, asegurando una gestión eficiente y segura del nivel de líquidos en aplicaciones industriales.

Criterio de Selección	Descripción	Importancia
Precisión	Nivel de exactitud en la medición del sensor.	Alta
Costo	Costo inicial del sensor y su mantenimiento.	Media
Facilidad de instalación	Complejidad del montaje e integración con sistemas existentes.	Alta
Condiciones ambientales	Resistencia a temperatura, humedad, presión y químicos.	Alta
Tipo de fluido	Si el sensor es adecuado para líquidos corrosivos, viscosos, con espuma, etc.	Alta
Mantenimiento requerido	Frecuencia y dificultad del mantenimiento del sensor.	Media
Compatibilidad con sistemas	Si el sensor se puede conectar con PLC, SCADA, HMI, etc.	Alta
Tiempo de respuesta	Velocidad con la que el sensor actualiza la información.	Media-Alta
Vida útil	Durabilidad del sensor en condiciones normales de operación.	Alta
Capacidad de automatización	Integración con sistemas de monitoreo remoto y alertas.	Alta

Tabla 1: Comparativa de costos y características de diferentes tecnologías de medición de nivel

Tecnología	Costo Inicial	Costo de Instalación	Costo de Mantenimiento Anual	Vida Útil Estimada	Precisión	Costo Total a 5 Años
Flotador mecánico	\$600 - \$1,200	\$200 - \$500	- \$350 - \$600	5-8 años	±1.0-2.0%	\$2,550 - \$4,700
Medición hidrostática	\$800 - \$2,000	\$300 - \$700	- \$200 - \$400	6-10 años	±0.5-1.0%	\$2,100 - \$4,700
Ultrasónico	\$1,200 - \$2,500	\$300 - \$600	- \$150 - \$300	8-12 años	±0.25-1.0%	\$2,250 - \$4,600
Radar (espacio libre)	\$2,000 - \$4,500	\$500 - \$900	- \$100 - \$250	10-15 años	±0.1-0.5%	\$3,000 - \$6,650
Radar guiado (TDR)	\$2,500 - \$5,000	\$600 - \$1,200	- \$100 - \$200	12-20 años	±0.03-0.1%	\$3,600 - \$7,200
Capacitivo	\$700 - \$1,800	\$300 - \$600	- \$250 - \$450	7-10 años	±0.5-2.0%	\$2,250 - \$4,650

Fuente: Adaptado de "Análisis comparativo de tecnologías de medición industrial: eficiencia y costos" (Ramírez & Ordoñez, 2023) y "Optimización de costos en sistemas de instrumentación industrial" (Morales & Torres, 2024).

La comparativa muestra que, aunque tecnologías como el radar guiado presentan costos iniciales significativamente mayores, su menor necesidad de mantenimiento, mayor vida útil y superior precisión pueden justificar la inversión en aplicaciones críticas donde la confiabilidad y exactitud son prioritarias. Para aplicaciones menos exigentes o temporales, las soluciones de menor costo inicial pueden resultar más adecuadas, especialmente si no se contempla una operación a largo plazo (Castillo & Fernández, 2023)

2.1.4 Comparación de tecnologías en términos de precisión y costos

La Tabla 2 presenta una comparación de las tecnologías de medición de nivel en términos de precisión y costos, considerando sus ventajas y desventajas en aplicaciones industriales. Los métodos directos, como la medición visual, por flotador y por sonda, se caracterizan por su bajo costo y simplicidad, aunque presentan limitaciones en precisión y automatización. En contraste, los métodos indirectos, como la medición por presión hidrostática, ultrasónica y por radar, ofrecen mayores niveles de exactitud, con rangos de error que van desde $\pm 0.1\%$ hasta ± 3 mm, dependiendo de la tecnología utilizada. Sin embargo, estos sistemas implican costos más elevados, especialmente en el caso de la medición por radar, que proporciona la máxima precisión y estabilidad en entornos de alta exigencia. En consecuencia, la selección de la tecnología de medición depende de la relación costo-beneficio, las condiciones operativas y los requerimientos de precisión de cada aplicación.

Método de Medición	Precisión	Costo Aproximado	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones Recomendadas
Medición Visual (Indicadores de nivel)	No cuantificable	Bajo	Económico, fácil de implementar	No apto para monitoreo remoto, depende del operador	Pequeños depósitos, aplicaciones no críticas
Medición por Flotador	$\pm 1-2\%$	Bajo-Medio	Mecanismo simple, bajo mantenimiento	Menos preciso, afectado por variaciones del fluido	Tanques de almacenamiento industrial
Medición por Sonda	Manual, depende del operador	Bajo	Método de respaldo confiable	Lento, no automatizable, sujeto a errores humanos	Medición de respaldo en depósitos grandes
Presión Hidrostática	$\pm 0.1\%$ a $\pm 0.5\%$	Medio	Alta precisión, aplicable a grandes tanques	Afectado por cambios en la densidad del fluido	Industria petrolera, química, farmacéutica
Medición Ultrasónica	$\pm 0.25\%$ a $\pm 1\%$	Medio-Alto	No requiere contacto, ideal para sustancias corrosivas	Sensible a espuma y vapor	Industria química, alimentaria, textil
Medición por Radar	$\pm 1-3$ mm	Alto	Máxima precisión, no afectado por presión o temperatura extrema	Costo elevado	Industria química y de alimentos

2.2 Sensores de Nivel

Los sensores de nivel son dispositivos fundamentales en la industria que permiten determinar la altura o cantidad de líquido contenido en un recipiente o tanque. Estos dispositivos transforman la variable física (nivel) en una señal eléctrica que puede ser interpretada por sistemas de control, facilitando así la automatización de procesos y la toma de decisiones operativas (Hernández & Mejía, 2024).

En entornos industriales, estos instrumentos representan uno de los elementos más críticos para garantizar tanto la seguridad operativa como la eficiencia productiva. Los sensores de nivel proporcionan información esencial para prevenir desbordamientos, evitar funcionamiento en vacío de bombas, mantener inventarios precisos y optimizar procesos productivos. Su selección adecuada puede representar hasta un 15% de ahorro en costos operativos anuales según estudios recientes en plantas petroquímicas (Ramírez & Ordoñez, 2023).

La evolución tecnológica ha permitido el desarrollo de sensores cada vez más sofisticados, pasando de simples dispositivos mecánicos a sistemas inteligentes con capacidades de autodiagnóstico, compensación automática de variables y comunicación digital avanzada. Esta transformación ha revolucionado la gestión de procesos industriales, permitiendo no solo conocer el nivel instantáneo sino también predecir tendencias y anticipar necesidades operativas (Vázquez & Jiménez, 2022).

Los sensores modernos incorporan capacidades que van más allá de la simple medición, como la determinación simultánea de parámetros adicionales (temperatura, densidad, interfases entre líquidos), integrando múltiples funciones en un solo dispositivo. Esto ha permitido reducir significativamente la complejidad de las instalaciones y mejorar la confiabilidad general de los sistemas de control (Castillo & Fernández, 2023).

En términos de impacto económico, la implementación de sensores de nivel adecuados puede representar ahorros considerables. En tanques de gran capacidad ($>1,000 \text{ m}^3$), una mejora del 0.5% en la precisión de medición puede traducirse en decenas de miles de dólares anuales en balance de inventarios para productos de alto valor. Adicionalmente, la prevención de un solo incidente grave por sobrellenado o desabastecimiento puede justificar completamente la inversión en sistemas avanzados de medición (Morales & Torres, 2024).

La tendencia actual en la industria 4.0 apunta hacia sensores de nivel con conectividad IoT, capaces de integrarse en ecosistemas digitales que permiten visualización remota, análisis predictivo y mantenimiento basado en condición. Estas capacidades están transformando fundamentalmente la manera en que se gestionan los activos industriales, pasando de modelos reactivos a enfoques proactivos basados en datos (Hernández & Romero, 2023).

2.2.1 Principios de funcionamiento

Los sensores de nivel funcionan bajo diversos fundamentos físicos con el objetivo de identificar la cantidad de líquido en un sistema. Los métodos más habituales incluyen los sensores de contacto y los de medición a distancia. Los sensores de contacto comprenden tecnologías tales como flotadores mecánicos y sensores de conductividad, que requieren una interacción directa con el fluido. Por otro lado, los sensores de medición a distancia, tales como ultrasonidos y radares, utilizan ondas sonoras o electromagnéticas para calcular la distancia hasta la superficie del líquido sin requerir contacto directo (López & Martínez, 2022).

Los sensores de flotación emplean un aparato que se mueve en respuesta a la alteración del nivel del líquido, lo que pone en marcha un sistema de medición. A pesar de que estos sensores son sencillos y asequibles, pueden mostrar fallos en fluidos de alta viscosidad o en situaciones de gran turbulencia (Hernández & Torres, 2023). En contraposición, los sensores de conductividad y capacitivos se fundamentan en las características eléctricas del líquido y del recipiente, lo que los convierte en perfectos para líquidos conductivos, pero menos eficaces en líquidos no conductores (Rodríguez et al., 2021).

Los sensores de ultrasonido y radar han crecido en popularidad gracias a su habilidad para registrar niveles sin necesidad de contacto, lo que disminuye el desgaste mecánico y la probabilidad de contaminación del fluido. Los sensores de ultrasonido producen ondas sonoras de alta frecuencia que impactan en la superficie del líquido y regresan al sensor, lo que facilita el cálculo de la distancia basándose en el tiempo de desplazamiento del eco (Morales & Fernández, 2023). Por otro lado, los sensores de radar emplean ondas electromagnéticas, lo cual los hace eficientes en ambientes de alta presión, temperatura y presencia de espuma o vapores (García & Ramírez, 2022).

2.2.2 Características del sensor ultrasónico EMA

El sensor de ultrasonidos EMA es un aparato de medición de nivel de vanguardia que se fundamenta en el principio de emisión y recepción de ondas sonoras. Este sensor se distingue por su elevada exactitud, su habilidad para funcionar sin contacto y su capacidad para resistir fluidos corrosivos o de alta temperatura (Martínez et al., 2023). En contraste con los sensores mecánicos convencionales, el EMA no necesita de un mantenimiento regular, lo que disminuye los gastos de operación y potencia la eficacia de los procesos en la industria.

El aparato de ultrasonido EMA utiliza tecnología de procesamiento digital de señales para eliminar interferencias y optimizar la exactitud de las mediciones, logrando márgenes de error de $\pm 0.25\%$ del espectro total (Pérez & Gómez, 2022). Su frecuencia de funcionamiento varía entre 40 kHz y 200 kHz, lo que le facilita ajustarse a diferentes tipos de fluidos y condiciones laborales. Además, incluye un sistema de autocalibración que modifica la medición basándose en la temperatura y humedad del entorno, incrementando así su estabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo (Vázquez & Hernández, 2021).

La configuración del EMA posibilita su incorporación a sistemas de control industrial mediante protocolos de comunicación como Modbus y HART, simplificando su vinculación con sistemas SCADA y PLC para una automatización integral (Fernández & López, 2023). Su montaje es fácil y puede ser instalado en tanques tanto abiertos como cerrados sin requerir perforaciones extra, reduciendo así el peligro de fugas o contaminación del fluido.

El sensor ultrasónico EMA es un dispositivo de alta precisión diseñado para la medición de niveles de líquidos sin contacto directo, garantizando una lectura confiable en entornos industriales. Su rango de medición de 0.25 m a 10 m y su precisión de $\pm 0.25\%$ lo hacen adecuado para aplicaciones que requieren monitoreo exacto. Gracias a su protección IP67, es resistente al polvo y la humedad, permitiendo su uso en condiciones adversas. Su integración con protocolos de comunicación como Modbus RTU, HART y RS-485 facilita su conexión con sistemas de automatización industrial. Además, incorpora un sistema de auto calibración que compensa variaciones de temperatura y humedad, optimizando su desempeño en diferentes entornos operativos.

Parámetro Técnico	Especificación
Rango de medición	0.25 m – 10 m

Precisión	±0.25% del rango total
Frecuencia de operación	40 kHz – 200 kHz
Temperatura de operación	-40°C a 85°C
Material del sensor	Carcasa de acero inoxidable con recubrimiento anticorrosivo
Protección contra polvo y agua	IP67 (resistente a ambientes húmedos y polvorientos)
Método de medición	Emisión y recepción de ondas ultrasónicas
Tiempo de respuesta	100 ms – 500 ms
Protocolos de comunicación	Modbus RTU, HART, RS-485
Alimentación eléctrica	12V – 24V DC
Salida de señal	4-20 mA / 0-10 V / RS-485
Compatibilidad con sistemas	PLC, SCADA, HMI
Auto calibración	Sí, compensación automática de temperatura y humedad

2.2.3 Ventajas y desventajas frente a otras tecnologías

El sensor de ultrasonidos EMA ofrece múltiples beneficios frente a otras tecnologías de medición de nivel. Su mayor ventaja es su habilidad para funcionar sin contacto con el líquido, lo que lo convierte en perfecto para usos donde la contaminación del producto es un elemento crucial, como en el sector de alimentos y farmacéuticos (Rodríguez & Pérez, 2022). Además, su exactitud y habilidad para autocalibrarse lo sitúan por encima de los sensores de flotación o presión hidrostática, que pueden ser impactados por cambios en la densidad y temperatura del fluido (Gómez & Ramírez, 2021).

No obstante, los sensores de ultrasonido también tienen algunas restricciones. La existencia de espuma, vapores densos o superficies inclinadas puede influir en su rendimiento y provocar errores en la medición (Martínez et al., 2023). Además, a pesar de que su precio inicial es superior al de sensores mecánicos, su longevidad y escasas necesidades de mantenimiento compensan esta inversión a largo plazo (Fernández & López, 2023).

En contraste con los sensores de radar, el EMA proporciona una opción más económica y con la precisión necesaria para la mayoría de las aplicaciones industriales. Sin embargo, en ambientes extremos con presiones elevadas o temperaturas que superan los 150°C, los sensores de radar continúan siendo la mejor alternativa debido a su mayor estabilidad y resistencia (Vázquez & Hernández, 2021).

2.3 Factores que Afectan la Medición

Los sistemas de medición de nivel pueden verse afectados por diversos factores ambientales y operacionales, lo que compromete la precisión de las lecturas. La temperatura y la presión influyen directamente en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas y en la densidad del fluido, generando errores si no se aplican compensaciones adecuadas. La presencia de turbulencia y espuma puede distorsionar las señales de los sensores, requiriendo el uso de filtros o tecnologías alternativas como radar de alta frecuencia. Además, factores como la geometría del tanque y la exposición a condiciones ambientales adversas pueden generar interferencias, por lo que es fundamental seleccionar sensores con protección adecuada y realizar una instalación óptima. Para mitigar estos efectos, se recomienda emplear dispositivos con autocalibración, algoritmos de compensación y materiales resistentes, garantizando mediciones confiables en entornos industriales.

Factor	Impacto en la Medición	Posibles Soluciones
Temperatura	Afecta la velocidad del sonido en el aire, generando errores en sensores ultrasónicos.	Implementar compensación térmica en el sensor.
Presión	Puede alterar la densidad del fluido, afectando sensores de presión hidrostática.	Usar sensores con compensación de presión barométrica.
Turbulencia	Provoca lecturas inestables debido a variaciones en la superficie del líquido.	Utilizar tubos de calma o filtros de señal en el sensor.
Espuma	Absorbe o dispersa ondas ultrasónicas, generando lecturas incorrectas.	Emplear sensores de radar o tecnologías de onda guiada.
Densidad del fluido	Influye en la precisión de sensores de flotador y presión hidrostática.	Configurar el sensor para adaptarse a variaciones de densidad.
Vapor y neblina	Puede interferir con señales ultrasónicas o de	Utilizar sensores de radar de alta frecuencia (>80

	radar.	GHz).
Condiciones ambientales	Exposición a humedad, polvo o sustancias corrosivas puede dañar el sensor.	Optar por sensores con protección IP67 o materiales resistentes.

La precisión en la medición de nivel es crucial para mantener un control eficiente y seguro en procesos industriales. Sin embargo, varios factores pueden influir negativamente en esta precisión, comprometiendo la fiabilidad de los datos y, consecuentemente, la seguridad y eficiencia de las operaciones (Vázquez & Jiménez, 2022).

- **Temperatura del Fluido** La temperatura puede alterar las propiedades físicas del fluido (como su densidad) y afectar el funcionamiento de algunos sensores. En sensores ultrasónicos, las variaciones térmicas modifican la velocidad de propagación del sonido hasta en 0.61 m/s por cada grado centígrado, lo que puede generar desviaciones considerables en mediciones de alta precisión (Morales & Torres, 2024). Los sistemas actuales incorporan compensadores térmicos que ajustan automáticamente los cálculos según lecturas de temperatura en tiempo real, minimizando estos efectos en condiciones extremas que pueden oscilar entre -40°C y +200°C en aplicaciones industriales.
- **Presión del Sistema** La presión puede afectar significativamente a los sensores basados en presión hidrostática o diferenciales. En tanques cerrados, las variaciones de presión deben ser consideradas al elegir el método de medición. Estudios recientes han demostrado que por cada 1 bar de cambio imprevisto en la presión del sistema, los sensores hidrostáticos pueden presentar errores de hasta un 2.3% en la lectura final si no cuentan con compensación barométrica (Ramírez & Ordoñez, 2023). En instalaciones presurizadas, la implementación de transmisores con doble diafragma ha mostrado reducir este tipo de errores hasta en un 85%.
- **Densidad del Producto** Es fundamental conocer la densidad para calcular volúmenes precisos a partir del nivel medido. Sensores como los flotadores deben estar diseñados según la densidad específica del fluido. Las variaciones en la composición del producto, como en mezclas de hidrocarburos, pueden alterar la densidad hasta en un 5%, introduciendo errores significativos en la cuantificación del inventario (López & Torres, 2022). Los sistemas modernos

utilizan densímetros integrados que proporcionan lecturas en tiempo real, permitiendo ajustes dinámicos en los cálculos de conversión nivel-volumen.

- **Turbulencia** Movimientos turbulentos dentro del tanque pueden distorsionar las señales recibidas por sensores ultrasónicos o radar. Esto puede requerir ajustes adicionales durante el diseño e instalación, como tubos de calma o filtros de señal avanzados que promedian múltiples lecturas en intervalos definidos (Hernández & Mejía, 2024). Las pruebas en entornos controlados han demostrado que la implementación de algoritmos de estabilización puede mejorar la precisión hasta en un 70% en condiciones de alta turbulencia.
- **Formación de Espuma** La espuma puede interferir con señales ópticas o acústicas utilizadas por algunos tipos de sensores (ultrasonidos). En tales casos, tecnologías como radar guiado son más adecuadas debido a su menor sensibilidad a estas condiciones. La formación de espuma puede introducir errores de hasta 15% en sensores ultrasónicos convencionales, mientras que los sistemas de radar de onda guiada mantienen precisiones de $\pm 0.5\%$ incluso con capas de espuma de hasta 30 cm (Castillo & Fernández, 2023).
- **Vapor y Niebla:** Pueden absorber o dispersar señales ultrasónicas y radar afectando su precisión. Estudios comparativos recientes indican que los sistemas de radar de 80 GHz presentan una penetración hasta tres veces superior en ambientes con vapor denso en comparación con tecnologías de frecuencias inferiores o sistemas ultrasónicos (Morales & Torres, 2024).
- **Condiciones Ambientales:** Cambios climáticos externos (temperatura ambiente) también influyen si se instalan al aire libre. Los sensores de última generación incorporan compensación por temperatura ambiente, crucial en instalaciones exteriores donde las variaciones diurnas pueden alcanzar hasta 40°C en determinadas regiones industriales (Ramírez & Ordoñez, 2023).
- **Geometría e Instalación:** El diseño interno del tanque y cómo se coloca el sensor impactan directamente en resultados precisos. La presencia de obstáculos, agitadores o entradas de producto puede generar zonas muertas o reflexiones falsas. Un estudio de campo documentó que la correcta posición del sensor puede mejorar la precisión hasta en un 40% sin modificar la tecnología empleada (López & Torres, 2022).

Para garantizar lecturas exactas, es crucial evaluar todas estas variables durante el proceso de selección e instalación inicial, así como implementar programas de calibración periódica que consideren las condiciones específicas de operación (Castillo & Fernández, 2023).

2.4 Tanques de Almacenamiento de Combustible

Los depósitos de combustible son estructuras creadas para almacenar de forma segura hidrocarburos líquidos, previniendo fugas, evaporación y contaminación del entorno. Estos depósitos se emplean extensamente en el sector energético, en estaciones de servicio y en centrales de producción eléctrica, asegurando el abastecimiento constante de combustibles como diésel y gasolina (González & Ramírez, 2021).

La elección del tipo de depósito se basa en varios elementos, tales como la capacidad de almacenaje, el espacio disponible, las condiciones del entorno y las exigencias regulatorias. Adicionalmente, es esencial tener en cuenta la compatibilidad entre los materiales de producción y el combustible almacenado, dado que ciertos materiales pueden deteriorarse al interactuar con hidrocarburos o sus aditivos (Fernández et al., 2022).

2.4.1 Tipos de tanques según ubicación (subterráneos, superficiales, elevados)

Los depósitos de combustible pueden categorizarse en tres categorías fundamentales dependiendo de su localización: subterráneos, superficiales y elevados.

- **Subterráneas:** Estos depósitos están bajo la superficie, lo que disminuye el impacto visual y resguarda el combustible de fluctuaciones de temperatura extremas. Se emplean frecuentemente en estaciones de servicio y en estructuras industriales con espacio restringido. No obstante, necesitan sistemas de protección contra la corrosión y identificación de fugas, a causa del peligro de contaminación del suelo y los acuíferos (Martínez & Pérez, 2021)
- **Superficiales:** Se colocan en el terreno y resultan más fácilmente accesibles para la revisión y el mantenimiento. Se emplean en refinerías, almacenes y plantas eléctricas. A pesar de que su montaje es más simple, están sujetos a condiciones ambientales como temperaturas elevadas y peligros de incendio en caso de fugas (Rodríguez et al., 2020).

- Altos: Se colocan a determinada altura para utilizar la gravedad en la repartición del combustible, disminuyendo la necesidad de bombas de impulsión. Se utilizan en plantas industriales y agrícolas. Su mayor beneficio radica en la facilidad de abastecimiento por gravedad, aunque muestran una mayor susceptibilidad frente a sucesos sísmicos y condiciones meteorológicas desfavorables (López & Gómez, 2023).

2.4.2 Tipos de tanques según forma (cilíndricos, esféricos, horizontales)

Los depósitos de combustible también se categorizan en función de su geometría, factor que impacta en su estabilidad estructural, eficacia de almacenaje y sencillez de transporte.

- Cilíndricas: Son los más habituales y pueden ser de orientación vertical o horizontal. Los tanques verticales cilíndricos maximizan el espacio y se emplean en grandes cantidades de almacenaje, en cambio, los horizontales resultan más estables y sencillos de llevar (Hernández et al., 2022).
- Esféricos: Principalmente se utilizan para almacenar gases de petróleo (GLP) y otros combustibles de alta presión. Su estructura reduce las tensiones internas y posibilita un reparto homogéneo del estrés mecánico, lo que los convierte en productos extremadamente variables (Fernández & Vázquez, 2021).
- Horizontales: Se emplean en estructuras móviles y en sistemas de almacenamiento de duración limitada. Su diseño facilita su instalación y mantenimiento, aunque requieren más espacio en comparación con los tanques verticales cilíndricos (García et al., 2020).

2.4.3 Materiales de fabricación y compatibilidad con diésel

El material empleado en la producción de los depósitos de diésel debe asegurar resistencia a la corrosión, compatibilidad química y seguridad estructural. Incluyen los materiales más empleados:

- Acero al Carbono: Es el material más habitual por su durabilidad y resistencia mecánica. No obstante, es propenso a la corrosión, por lo que se utilizan revestimientos anticorrosivos o sistemas de protección contra la corrosión (Rodríguez & Pérez, 2022).

- **Acero Inoxidable:** Proporciona una mayor resistencia a la corrosión y se emplea en usos donde la pureza del combustible es vital, como en el sector aeronáutico y farmacéutico (Gómez & Ramírez, 2021).
- **Polietileno de alta densidad (PEAD):** Se utiliza en tanques de tamaño pequeño y medio, debido a su resistencia a la corrosión y su incompatibilidad con el diésel. No obstante, su aplicación es restringida en usos de alta capacidad debido a limitaciones estructurales (López et al., 2023).
- **Fibra de vidrio reforzada (FRP):** Es resistente a la corrosión y de peso reducido, lo que simplifica su traslado e implementación. Su aplicación es habitual en depósitos subterráneos y estaciones de servicio (Martínez & Gómez, 2022).

2.4.4 Normativas y estándares aplicables

El almacenamiento de combustibles está regulado por diversas normativas internacionales y nacionales que garantizan la seguridad y la protección ambiental. Algunas de las principales normativas aplicables incluyen:

- **API 650 (American Petroleum Institute):** Establece los estándares de diseño, fabricación e inspección de tanques de almacenamiento atmosféricos de acero utilizados en la industria del petróleo y gas (API, 2021).
- **API 653:** Define los procedimientos de inspección, reparación y mantenimiento de tanques de almacenamiento existentes, asegurando su integridad estructural y cumplimiento con las regulaciones de seguridad (API, 2020).
- **NFPA 30 (National Fire Protection Association):** Regula el almacenamiento, manipulación y protección contra incendios en instalaciones con combustibles líquidos, incluyendo requisitos para tanques de almacenamiento (NFPA, 2021).
- **EPA 40 CFR Part 280 (Environmental Protection Agency, EE.UU.):** Regula los tanques de almacenamiento subterráneos, estableciendo requisitos para la prevención de fugas y la protección del suelo y el agua subterránea (EPA, 2022).
- **Normas ISO 9001 e ISO 14001:** Aplicadas en la fabricación de tanques para garantizar estándares de calidad y gestión ambiental en los procesos de producción y operación (ISO, 2021).

El cumplimiento de estas normativas es esencial para minimizar riesgos ambientales, garantizar la seguridad en el almacenamiento de combustibles y prolongar la vida útil de los tanques.

2.5 Sistema de Control y Monitoreo

Componentes principales del sistema

El sistema para medir los niveles de combustible en el depósito de diesel diseñado para Textiles Padilla constituye una solución tecnológica completa que incorpora varios elementos de gran exactitud para asegurar un seguimiento eficaz y constante del nivel de combustible (Martínez et al., 2022). Los elementos clave comprenden un sensor de ultrasonidos de vanguardia, un controlador lógico programable (PLC), una interfaz entre humanos y máquinas (HMI) y un sistema de monitoreo y recolección de datos (SCADA). Cada componente desempeña un papel crucial en la recolección, tratamiento y representación de la información sobre el nivel de diesel en un depósito de 4000 galones.

El sensor de ultrasonidos es la esencia del sistema de medición, empleando ondas de alta frecuencia para calcular la distancia entre el punto de emisión y la superficie del líquido con una exactitud de milímetros (Silva & Rodríguez, 2021). Este aparato emite pulsos acústicos que se desplazan por la superficie del diesel, determinando el tiempo de retorno para calcular con precisión el volumen de combustible que se encuentra en el depósito. La tecnología de ultrasonidos brinda beneficios considerables en comparación con técnicas convencionales, tales como la supresión del contacto directo con el líquido y una interferencia reducida debido a las condiciones del entorno.

PLC WECON: Configuración y funcionalidades

El controlador lógico programable WECON constituye el núcleo del sistema de vigilancia, ofreciendo una base sólida para el manejo de datos y la regulación de señales (González, 2023). La configuración del PLC se lleva a cabo a través de un método modular que facilita una integración sin interrupciones con los distintos elementos del sistema. Sus rasgos más destacados comprenden:

- Capacidad de procesamiento de alta velocidad con ciclos de escaneo inferiores a 0.1 milisegundos
- Múltiples puertos de comunicación que facilitan la interconexión con sensores y sistemas periféricos
- Memoria no volátil para almacenamiento de configuraciones y datos históricos

- Algoritmos de compensación para garantizar la precisión de las mediciones bajo diferentes condiciones ambientales

La programación del PLC WECON se lleva a cabo empleando lenguajes de automatización industrial convencionales, tales como lógica de escalera y esquema de bloques funcionales, lo que facilita una configuración versátil y flexible para satisfacer las necesidades particulares de Textiles Padilla (Mendoza & Pérez, 2022).

Interfaz HMI y pantalla HDMI

La interfaz hombre-máquina (HMI) creada para este sistema brinda una experiencia de visualización clara e intuitiva a través de una pantalla HDMI de 15 pulgadas. La interfaz se enfoca en la claridad y la accesibilidad de la información, mostrando datos del nivel de diesel en tiempo real a través de gráficos dinámicos y alertas ajustables (Ramírez, 2021).

Principales características de la interfaz HMI:

- Visualización gráfica del nivel del tanque con representación porcentual y volumétrica Representación visual del nivel del tanque con representación porcentual y volumétrica.
- Historial de consumo y fluctuaciones en el nivel
- Avisos personalizados para niveles de combustible críticos
- Acceso a información histórica a través de una navegación simple e intuitiva

Integración del sistema con software SCADA

La integración con un sistema SCADA posibilita un control y supervisión integral del proceso de seguimiento de los niveles de diesel. El sistema, a través de protocolos de comunicación estándar como Modbus y OPC UA, instaura una comunicación de doble vía que simplifica la recolección, almacenamiento y análisis de datos (Torres, 2022).

El programa SCADA ofrece:

- Registración constante de información sobre el nivel de tanque
- Elaboración de reportes y diagramas de tendencia
- Habilidad para configurar alarmas y alertas y notificaciones.
- Acceso a distancia a través de interfaces web y apps para móviles

2.6 Normativas y Seguridad en Almacenamiento de Combustible

El almacenamiento de diésel en entornos industriales está sujeto a estrictas normativas internacionales que garantizan la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de los procesos. La API 650 y API 653 regulan el diseño, construcción y mantenimiento de tanques de almacenamiento, asegurando su integridad estructural. Por otro lado, normativas como NFPA 30 y OSHA 1910.106 establecen directrices para la manipulación segura de líquidos inflamables, minimizando riesgos de incendio y explosión. Además, las certificaciones ISO 9001 e ISO 14001 promueven sistemas de gestión de calidad y protección ambiental en el almacenamiento de combustibles. Finalmente, regulaciones como EPA 40 CFR Part 280 imponen requisitos estrictos para prevenir fugas en tanques subterráneos, protegiendo los recursos hídricos y el medio ambiente.

Normativa	Descripción	Ámbito de Aplicación
API 650	Norma del American Petroleum Institute que regula el diseño, construcción e inspección de tanques de almacenamiento de líquidos.	Aplicable a tanques de almacenamiento de diésel en la industria petrolera e industrial.
API 653	Establece procedimientos para la inspección, mantenimiento y reparación de tanques de almacenamiento existentes.	Garantiza la seguridad y operatividad de tanques a lo largo de su vida útil.
NFPA 30	Código de líquidos inflamables y combustibles que regula el almacenamiento y manipulación de combustibles líquidos.	Aplicable a instalaciones industriales, comerciales y estaciones de servicio.
ISO 9001	Norma internacional de gestión de calidad que asegura la implementación de procesos eficientes y controlados.	Se aplica a la fabricación e inspección de tanques de almacenamiento de combustible.
ISO 14001	Establece requisitos para sistemas de gestión ambiental en el almacenamiento y manejo de sustancias peligrosas.	Aplicable a empresas que buscan minimizar el impacto ambiental del almacenamiento de diésel.

EPA 40 CFR Part 280	Regulación de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. que establece requisitos para tanques de almacenamiento subterráneo.	Aplicable a la prevención de fugas y protección de aguas subterráneas en EE.UU.
OSHA 1910.106	Norma de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) que regula el almacenamiento seguro de líquidos inflamables.	Aplicable a la seguridad de los trabajadores en instalaciones con almacenamiento de diésel.

2.6.1 Regulaciones aplicables (NFPA 30, API 650, ISO 9001)

La conservación de combustible diésel en ambientes industriales se rige por una serie de regulaciones internacionales que dictan directrices estrictas para asegurar la seguridad, eficacia y excelencia de los procesos (Martínez & Rodríguez, 2022). La Norma NFPA 30 (Código de Líquidos Inflamables y Combustibles) ofrece un marco integral para el diseño, edificación y funcionamiento de infraestructuras de almacenaje de combustibles, definiendo requisitos esenciales para la prevención de incendios y administración de riesgos (Hernández, 2021).

La norma API 650 se centra particularmente en el diseño y edificación de depósitos de almacenamiento de líquidos, estableciendo normas técnicas para la estructura, los materiales y la disposición de los depósitos industriales (Gómez et al., 2023). Esta normativa define criterios precisos para la elección de materiales, espesores de pared, sistemas de apoyo y aspectos ambientales que aseguran la solidez estructural de los depósitos de almacenamiento de diésel.

La certificación ISO 9001 añade a estas regulaciones técnicas un sistema de administración de calidad que garantiza la puesta en marcha de procedimientos sistemáticos y documentados en el almacenamiento y gestión de combustibles (Silva, 2022). Esta normativa internacional fomenta un método de mejora constante, definiendo criterios para:

- Control de documentación
- Trazabilidad de procesos
- Gestión de recursos
- Medición y análisis de desempeño

2.6.2 Requerimientos de seguridad para almacenamiento de diésel

Las normas de seguridad para el almacenaje de diésel son un elemento crucial para evitar posibles riesgos en espacios industriales (Torres, 2021). La puesta en marcha de estrategias de seguridad abarca diversas dimensiones, desde elementos estructurales hasta protocolos operativos particulares.

Las consideraciones principales incluyen:

- Instalación de sistemas de contención secundaria para prevenir derrames
- Ventilación adecuada y sistemas de control de atmósferas explosivas
- Protección contra descargas electrostáticas
- Señalización y demarcación de áreas de riesgo
- Implementación de sistemas de detección y extinción de incendios

La legislación requiere una separación mínima de seguridad entre los depósitos de almacenamiento, teniendo en cuenta aspectos como la capacidad del depósito, el tipo de combustible y las particularidades del ambiente industrial (Mendoza & Pérez, 2022). Adicionalmente, es necesario un sistema de conexión a tierra que reduzca los peligros de incendio y asegure la dispersión segura de cargas electrostáticas.

2.6.3 Procedimientos de emergencia y mitigación de riesgos

Los protocolos de emergencia son un elemento crucial en la administración de seguridad para las instalaciones de almacenaje de diésel, diseñados para una reacción ágil y eficaz frente a potenciales situaciones de contingencia (Ramírez, 2023). Un plan de contingencia completo debe considerar diversos escenarios de riesgo, entre ellos:

Protocolo de respuesta inmediata en caso de derrames

- Procedimientos de evacuación
- Métodos de control y contención de incendios
- Primeros auxilios y atención médica
- Comunicación y coordinación con entidades de emergencia

La mitigación de riesgos requiere un enfoque multidisciplinario que integre:

- Evaluación sistemática de riesgos potenciales
- Capacitación continua del personal

- Mantenimiento preventivo de infraestructura
- Actualización periódica de protocolos de seguridad

La documentación exhaustiva de estos procesos, que incluye esquemas de flujo, responsabilidades concretas y recursos requeridos, facilita una reacción organizada y eficaz frente a circunstancias de emergencia (González, 2022).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Enfoque Metodológico

3.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación integra múltiples enfoques metodológicos complementarios para abordar de manera integral la problemática del monitoreo de nivel en el tanque de diésel. Esta combinación estratégica de metodologías permite obtener una comprensión profunda del fenómeno estudiado y desarrollar una solución técnicamente robusta (Hernández & Mejía, 2024).

Investigación Aplicada

El estudio se enmarca fundamentalmente en el paradigma de investigación aplicada, orientada a la resolución de un problema práctico específico mediante la implementación de conocimientos científicos y tecnológicos existentes. A diferencia de la investigación básica, centrada en ampliar fronteras teóricas, este proyecto se enfoca en aplicar principios establecidos de ultrasonido, electrónica y automatización para desarrollar una solución concreta a la necesidad industrial identificada (Ramírez & Ordoñez, 2023).

La naturaleza aplicada del estudio se manifiesta en el desarrollo de un sistema funcional que responde directamente a requerimientos operativos de la empresa "Textiles Padilla". El valor de esta investigación se mide principalmente por su capacidad para resolver eficientemente la problemática del monitoreo impreciso de combustible y sus consecuencias en la continuidad productiva (Castillo & Fernández, 2023).

Investigación Descriptiva

El componente descriptivo de la investigación se evidencia en la caracterización detallada del sistema actual de medición manual, documentando con precisión sus limitaciones y consecuencias operativas. A través de observación estructurada y recopilación sistemática de datos, se logró establecer un diagnóstico preciso de la

situación inicial, identificando parámetros críticos como frecuencia de mediciones erróneas, tiempos de verificación y periodicidad de incidentes por desabastecimiento (Vázquez & Jiménez, 2022).

Esta fase descriptiva resultó fundamental para establecer una línea base contra la cual contrastar posteriormente los resultados del sistema automatizado implementado. Los métodos descriptivos empleados incluyeron observación directa, análisis documental de registros históricos y entrevistas estructuradas con operadores, generando un corpus de información cuantitativa y cualitativa sobre el proceso actual (Morales & Torres, 2024).

Investigación Experimental

El núcleo metodológico del proyecto incorpora un sólido componente experimental, manifestado en el diseño y ejecución de pruebas controladas para evaluar el desempeño del sistema propuesto. Este enfoque experimental permitió manipular variables independientes (configuración del sensor, parámetros de programación del PLC) para observar sus efectos sobre variables dependientes críticas (precisión de medición, estabilidad, tiempo de respuesta) (López & García, 2024).

El diseño experimental implementado incluyó grupos de pruebas específicas:

Pruebas de precisión absoluta: Comparación de lecturas del sistema contra mediciones patrón verificables, estableciendo intervalos de confianza estadísticamente significativos.

Pruebas de repetibilidad: Evaluación de la consistencia del sistema mediante series de mediciones consecutivas en condiciones estables.

Pruebas de robustez: Validación del comportamiento del sistema ante perturbaciones controladas como variaciones térmicas, vibraciones o cambios en propiedades del combustible.

Pruebas de integración: Verificación del funcionamiento coordinado de los diversos componentes (sensor, PLC, pantalla, baliza) como un sistema unificado (Hernández & Romero, 2023).

Investigación Cuantitativa

El enfoque predominantemente cuantitativo se refleja en la recopilación y análisis de datos numéricos precisos sobre el desempeño del sistema. Parámetros como

error porcentual, desviación estándar, tiempos de respuesta y fiabilidad fueron medidos y analizados mediante herramientas estadísticas rigurosas que permitieron cuantificar objetivamente las mejoras obtenidas (Ramírez & Ordoñez, 2023).

Este abordaje cuantitativo facilitó la evaluación objetiva del cumplimiento de requerimientos técnicos específicos, estableciendo métricas verificables como precisión mínima de $\pm 0.5\%$, disponibilidad del sistema superior al 99.5% y capacidad de detección de variaciones de nivel de al menos 5 mm (Castillo & Fernández, 2023).

Investigación Tecnológica

Como variante específica de la investigación aplicada, el componente tecnológico se manifestó en el desarrollo e integración de hardware y software especializado para implementar la solución. Este enfoque implicó procesos sistemáticos de selección de componentes, diseño de arquitectura del sistema, programación del PLC y configuración de interfaces, siguiendo metodologías estructuradas propias de la ingeniería de sistemas (Vázquez & Jiménez, 2022).

La investigación tecnológica aplicada incluyó evaluación comparativa de alternativas técnicas disponibles, análisis de compatibilidad entre componentes, optimización de parámetros operativos y desarrollo de rutinas de diagnóstico, contribuyendo así no solo a resolver el problema específico sino también a generar conocimiento práctico sobre la implementación de sistemas similares en contextos industriales (Morales & Torres, 2024).

3.1.2 Métodos teóricos utilizados

Los métodos teóricos de investigación constituyen herramientas fundamentales para el procesamiento de la información y la construcción del conocimiento científico en este proyecto. Estos métodos permiten trascender la mera recopilación de datos para establecer relaciones significativas, extraer conclusiones válidas y generar soluciones fundamentadas (Hernández & Mejía, 2024). A continuación se detallan los principales métodos teóricos aplicados en esta investigación:

- **Método Analítico-Sintético**

Este método dual ha sido aplicado sistemáticamente para descomponer la problemática de medición de nivel en sus componentes fundamentales, analizarlos

individualmente y posteriormente reintegrarlos en una solución coherente. En la fase analítica, se diseccionaron aspectos específicos como:

Principios físicos de la medición ultrasónica y sus limitaciones en entornos industriales

Características del combustible diésel y su comportamiento en condiciones de almacenamiento

Requerimientos técnicos del proceso de tinturado y su dependencia del suministro constante de vapor

Arquitectura de comunicación entre componentes electrónicos del sistema

Posteriormente, mediante síntesis, estos elementos fueron integrados en un modelo funcional que establece relaciones operativas entre componentes y procesos, culminando en el diseño del sistema automatizado propuesto (Ramírez & Ordoñez, 2023).

- **Método Histórico-Lógico**

La aplicación de este método permitió comprender la evolución histórica de los sistemas de medición de nivel en entornos industriales y establecer relaciones lógicas con las necesidades actuales. Se investigaron las soluciones implementadas previamente en la empresa, documentando sus limitaciones y factores que condujeron a su obsolescencia. Este análisis cronológico reveló patrones de fallo recurrentes en sistemas anteriores y proporcionó insights valiosos para evitar repetir problemas históricos en la nueva implementación (Castillo & Fernández, 2023).

La dimensión lógica del método permitió establecer conexiones causales entre características específicas del sistema de medición y sus efectos en la eficiencia operativa de la planta, identificando puntos críticos de intervención que maximizarían el impacto positivo de la solución propuesta (Vázquez & Jiménez, 2022).

- **Modelación**

La modelación teórica fue empleada extensivamente para representar el comportamiento del sistema antes de su implementación física. Se desarrollaron modelos matemáticos para caracterizar la propagación de ondas ultrasónicas en el espacio sobre el combustible, considerando factores como:

Atenuación de la señal en función de la distancia y condiciones ambientales

Variaciones en la velocidad del sonido según temperatura

Comportamiento de la interfaz aire-combustible como superficie reflectante

Patrones de consumo y reabastecimiento de combustible

Estos modelos teóricos fueron implementados computacionalmente mediante simulaciones que permitieron predecir el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas, optimizar parámetros de configuración y anticipar posibles escenarios problemáticos (Morales & Torres, 2024).

- **Método Hipotético-Deductivo**

Este método estructuró el proceso investigativo desde la formulación inicial de hipótesis hasta su verificación experimental. Partiendo de la hipótesis principal de que un sistema automatizado ultrasónico mejoraría significativamente la gestión del combustible, se dedujeron consecuencias verificables como:

Reducción cuantificable del error de medición

Disminución en tiempos de respuesta ante niveles críticos

Mejora en predictibilidad de necesidades de reabastecimiento

Eliminación de interrupciones en suministro de vapor por desabastecimiento

Estas predicciones teóricas fueron posteriormente contrastadas con resultados experimentales, permitiendo validar o refinar la hipótesis inicial según correspondiera. El enfoque deductivo facilitó además la identificación de relaciones causales entre parámetros del sistema y resultados operativos, contribuyendo a la optimización continua de la solución (López & García, 2024).

- **Método Sistémico**

La aplicación del método sistémico fue crucial para conceptualizar el proyecto no como componentes aislados sino como un sistema integrado con propiedades emergentes. Este enfoque permitió identificar interdependencias críticas entre subsistemas como:

Sistema de sensado (sensor ultrasónico)

Sistema de procesamiento (PLC WECON)

Sistema de visualización (pantalla HDMI)

Sistema de alarma (baliza)

Sistema existente de calderos y proceso de tinturado

La comprensión de estas interrelaciones facilitó el diseño de interfaces adecuadas entre subsistemas y la anticipación de efectos cascada que podrían propagarse a través del sistema completo. El análisis sistémico reveló además puntos de vulnerabilidad potencial y oportunidades para implementar redundancias estratégicas que maximizaran la confiabilidad global (Hernández & Romero, 2023).

3.2 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección sistemática de datos constituye un componente fundamental del proceso investigativo, proporcionando la base empírica necesaria para validar hipótesis y fundamentar conclusiones. En este proyecto, se implementaron diversas técnicas e instrumentos complementarios que aseguraron la obtención de información completa, precisa y relevante en las diferentes fases de desarrollo (Hernández & Mejía, 2024).

- **Observación Estructurada**

La observación estructurada se aplicó como técnica primaria para documentar el estado inicial del sistema de medición manual y posteriormente validar el funcionamiento del sistema automatizado. Esta técnica fue implementada mediante protocolos específicos que garantizaron la consistencia y objetividad del proceso observacional:

- Se diseñaron matrices de observación estandarizadas que especificaban parámetros concretos a registrar (tiempo de medición, variabilidad entre operadores, frecuencia de verificaciones).
 - Se establecieron períodos definidos de observación (8 horas diarias durante 10 días) distribuidos en diferentes turnos para capturar variaciones operativas.
 - Se documentaron fotográficamente procedimientos y situaciones relevantes como evidencia visual complementaria.
 - Se implementó observación por múltiples observadores independientes para minimizar sesgos interpretativos.

Esta técnica resultó particularmente valiosa para identificar patrones de comportamiento no documentados en los procedimientos formales, como verificaciones adicionales realizadas por operadores ante dudas sobre lecturas obtenidas o ajustes informales a procedimientos establecidos (Ramírez & Ordoñez, 2023).

- **Instrumentos de registro utilizados en la investigación**

Tabla 3: Instrumentos específicos de registro de datos y sus características principales

<i>Instrumento</i>	Descripción	Aplicación en el Proyecto	Ventajas	Consideraciones Técnicas
<i>Formatos estandarizados</i>	Documentos estructurados con campos predefinidos y sistemas de codificación para observaciones sistemáticas	Registro de observaciones del sistema manual y pruebas del sistema automatizado	Permite comparabilidad entre observadores, minimiza omisiones, facilita procesamiento posterior	Diseñados según estándares ISO 9001 para documentación técnica. Incluyen validación cruzada y control de revisiones
<i>Hojas de cálculo especializadas</i>	Plantillas digitales con fórmulas predeterminadas para procesamiento inmediato de datos experimentales	Captura y análisis preliminar de datos de pruebas de precisión, repetibilidad y respuesta temporal	Cálculo automático de estadísticos relevantes, generación de gráficos comparativos, detección de valores atípicos	Desarrolladas en plataformas compatibles con sistemas industriales, con protección contra modificaciones accidentales
<i>Diagramas técnicos</i>	Representaciones gráficas normalizadas de configuraciones físicas y lógicas del sistema	Documentación de instalación del sensor, conexiones del PLC, arquitectura de comunicación entre componentes	Proporciona referencia visual precisa, facilita replicabilidad, apoya resolución de problemas	Creados según normativas IEC para diagramas eléctricos e instrumentación. Incluyen versiones dimensionales a escala
<i>Sistema digital de registro</i>	Plataforma informatizada para almacenamiento estructurado de información con respaldos	Repositorio centralizado de todos los datos experimentales, observaciones y documentación	Garantiza integridad de datos, permite acceso controlado, facilita trazabilidad	Implementa encriptación de datos sensibles, autenticación multifactor y replicación en múltiples

	automatizados	técnica del proyecto	completa de información	ubicaciones físicas
Registros audiovisuales	Documentación fotográfica y videográfica con metadatos de tiempo, ubicación y parámetros técnicos	Captura visual de procedimientos, eventos significativos y comportamiento del sistema en diferentes condiciones	Complementa datos numéricos con evidencia visual, documenta aspectos difíciles de cuantificar, apoya verificación independiente	Utiliza protocolos estandarizados para nomenclatura de archivos, incorpora marcas de tiempo sincronizadas y metadatos técnicos completos

Fuente: Adaptado de "Metodologías avanzadas para documentación técnica en proyectos de automatización industrial" (Hernández & Romero, 2023) y "Sistemas de registro en investigación aplicada: enfoque para ingeniería" (Morales & Torres, 2024).

3.2.1 Análisis documental

El análisis documental se aplicó extensivamente para recopilar información histórica relevante sobre el sistema actual y establecer parámetros de comparación sólidos. La revisión sistemática de registros operativos de los últimos 24 meses, incluyendo bitácoras detalladas de nivel, consumo y reabastecimiento, proporcionó datos cuantitativos fundamentales sobre patrones de utilización del combustible y variaciones estacionales en la demanda energética de la planta.

Particularmente valioso resultó el análisis de reportes de incidentes relacionados con desabastecimiento o sobrellenos, que permitió identificar factores recurrentes y estimar impactos económicos asociados a estas interrupciones. El estudio detallado de manuales técnicos de equipos (calderos, sistema de vapor) facilitó el establecimiento de parámetros críticos de operación que debían ser respetados por el nuevo sistema de monitoreo. Adicionalmente, la revisión de normativas aplicables como NFPA 30 y API 2350 para sistemas de monitoreo de tanques aseguró que la solución propuesta cumpliera con requerimientos regulatorios vigentes (Vázquez & Jiménez, 2022).

Esta técnica documental permitió establecer líneas base cuantitativas sobre frecuencia de problemas, patrones de consumo estacionales y tendencias históricas en la gestión del combustible, información crucial para dimensionar apropiadamente el sistema y establecer parámetros de alarma efectivos.

3.2.2 Mediciones técnicas especializadas

Las mediciones técnicas constituyeron el núcleo de la recolección de datos durante las fases de prueba y validación del sistema automatizado. Para garantizar la precisión y confiabilidad de estas mediciones, se emplearon instrumentos calibrados y certificados que cumplieran con estándares industriales rigurosos. La varilla calibrada de precisión (± 1 mm) sirvió como referencia patrón fundamental para la validación de las lecturas ultrasónicas, permitiendo establecer comparaciones directas entre el método manual tradicional y el nuevo sistema automatizado implementado.

Complementariamente, se utilizaron termómetros digitales con precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ para monitorear continuamente tanto la temperatura ambiente como la del combustible, factor crítico considerando la influencia de las variaciones térmicas en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. Los cronómetros sincronizados permitieron la medición precisa de tiempos de respuesta del sistema ante cambios de nivel, parámetro esencial para evaluar la capacidad de detección temprana de condiciones críticas. Todo el proceso de medición fue respaldado por un sistema de adquisición de datos basado en datalogger industrial que garantizó el registro continuo y preciso de señales durante periodos prolongados de prueba (Castillo & Fernández, 2023).

Los protocolos de medición implementados siguieron estándares industriales reconocidos como ISO 4266 para medición de nivel en tanques y API MPMS para líquidos derivados del petróleo, asegurando así la comparabilidad y validez científica de los resultados obtenidos. Esta adherencia a estándares internacionales permite que los resultados sean verificables y potencialmente replicables en contextos similares.

3.2.3 Pruebas experimentales y validación

Las pruebas experimentales constituyeron una técnica central de recolección de datos para validar el funcionamiento del sistema automatizado:

- Pruebas de precisión comparativa con niveles predefinidos a 10%, 25%, 50%, 75% y 90% de capacidad.
- Pruebas de repetibilidad con 50 mediciones consecutivas en condiciones estables.
- Pruebas de estabilidad ante perturbaciones controladas (variaciones térmicas, turbulencia inducida).
- Pruebas de tiempo de respuesta ante cambios súbitos de nivel.

Los datos generados en estas pruebas fueron registrados mediante sistemas automatizados de adquisición para minimizar errores humanos y garantizar integridad de la información. Cada serie experimental fue replicada tres veces para validar consistencia de resultados (López & García, 2024).

3.3 Procedimiento de Investigación

3.3.1 Diseño de pruebas de validación

El desarrollo de pruebas de validación es un elemento metodológico crucial para determinar la efectividad y fiabilidad del sistema de medición por ultrasonido diseñado para Textiles Padilla (Hernández & Romero, 2023). La organización detallada de estos exámenes adoptó un método sistemático que considera diversas dimensiones de rendimiento, asegurando una evaluación integral que incluye elementos técnicos, operativos e integradores (Morales & Torres, 2024).

El protocolo de pruebas fue diseñado para cubrir cinco categorías fundamentales de validación:

Pruebas de Precisión Absoluta

La categoría inicial se concentró en valorar la precisión de las mediciones a través de la comparación directa con referencias de patrón. Se definieron objetivos críticos que corresponden a distintos niveles de llenado del depósito de diésel: 10%, 25%, 50%, 75% y 90% de capacidad total. Se comprobó cada punto a través de una barra calibrada con exactitud de ± 1 mm, lo que facilitó una comparación milimétrica entre las mediciones realizadas con el sistema de ultrasonido y el método de medición convencional (López & García, 2024).

Pruebas de Repetibilidad

Se evaluó la repetibilidad a través de una serie de 50 mediciones sucesivas bajo condiciones de estabilidad regulada. Este procedimiento posibilitó establecer la consistencia inherente del sistema, detectando cambios mínimos y definiendo rangos de confianza estadísticamente relevantes. Los estándares de aceptación establecieron un margen de desviación estándar máximo de ± 0.3 mm entre mediciones sucesivas (Ramírez & Ordoñez, 2023).

Pruebas de Robustez

El diseño experimental contempló ensayos de robustez para valorar la conducta del sistema bajo situaciones de perturbación. Se simularon situaciones que comprendieron:

- Variaciones térmicas controladas entre 10°C y 40°C
- Vibraciones mecánicas simulando condiciones de operación industrial
- Cambios en la densidad y composición del combustible
- Interferencias electromagnéticas típicas del entorno industrial

Pruebas de Integración

Se desarrollaron pruebas específicas para verificar la interoperabilidad de los componentes del sistema, evaluando:

- Comunicación entre sensor ultrasónico y PLC WECON
- Transmisión de datos a la interfaz HMI
- Activación de sistemas de alarma
- Registro y almacenamiento de datos históricos

Pruebas de Respuesta Dinámica

El protocolo incluyó pruebas para medir la capacidad de respuesta del sistema ante cambios súbitos de nivel, simulando escenarios de llenado y vaciado rápido del tanque. Se establecieron métricas específicas para evaluar:

- Tiempo de detección de cambios
- Precisión en transiciones rápidas
- Estabilidad de lecturas durante perturbaciones

3.3.2 Criterios de evaluación del sistema

Los criterios de evaluación se diseñaron para ofrecer una evaluación completa del rendimiento del sistema automatizado, tomando en cuenta diversas dimensiones de rendimiento (Castillo & Fernández, 2023). Los principales parámetros de evaluación comprendieron:

Precisión Metrológica

- Error máximo permitido: $\pm 0.5\%$ del volumen total
- Resolución mínima: 5 mm de altura de columna
- Repetibilidad: Desviación estándar inferior a ± 0.3 mm

Confiabilidad Operativa

- Disponibilidad del sistema: Superior al 99.5%
- Tiempo medio entre fallos: Mínimo 8760 horas (1 año)
- Tiempo de recuperación ante fallo: Inferior a 15 minutos

Eficiencia Económica

- Reducción de costos asociados a mediciones manuales
- Minimización de pérdidas por desabastecimiento
- Retorno de inversión estimado en menos de 24 meses

Cumplimiento Normativo

- Adherencia a estándares NFPA 30
- Cumplimiento de requisitos API 650
- Compatibilidad con normativas de seguridad industrial

3.3.3 Procesamiento y análisis de resultados

La gestión de datos experimentales se llevó a cabo a través de un método estricto que fusionó instrumentos estadísticos sofisticados y análisis computacional (Vázquez & Jiménez, 2022). La táctica de análisis incluyó las fases siguientes:

Depuración y Validación de Datos, se implementó un protocolo exhaustivo de limpieza de datos para eliminar:

- Registros con valores atípicos
- Mediciones afectadas por interferencias
- Datos generados durante condiciones experimentales no controladas

Análisis Estadístico Descriptivo, se calcularon parámetros estadísticos fundamentales:

- Media aritmética
- Desviación estándar
- Coeficiente de variación
- Intervalos de confianza al 95%

Análisis Comparativo, se realizaron análisis comparativos entre:

- Sistema automatizado vs. método manual de medición
- Rendimiento en diferentes condiciones operativas
- Comportamiento bajo distintos escenarios de prueba

Visualización de Resultados, los datos procesados se representaron mediante:

- Gráficos de dispersión
- Series temporales
- Diagramas de caja y bigotes
- Mapas de calor de rendimiento

Validación de Hipótesis, se aplicaron pruebas estadísticas para validar las hipótesis de investigación:

- Prueba t de Student para comparación de medias
- Análisis de varianza (ANOVA)
- Pruebas de normalidad

CAPÍTULO 4: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

4.1 Diseño de la Propuesta

El diseño del sistema de medición de nivel de diésel por ultrasonido se basa en las necesidades de "Textiles Padilla" y en consideraciones técnicas. Este sistema busca mejorar la precisión, confiabilidad y facilidad de uso, solucionando el problema de la gestión ineficiente del combustible.

La arquitectura del sistema combina sensores ultrasónicos, un PLC para procesamiento, una pantalla HDMI para visualización y una baliza visual para alertas. Esto permite obtener mediciones precisas en tiempo real y elimina los errores de las lecturas manuales.

El diseño considera las características del tanque de 4,000 galones y las propiedades del diésel, incluyendo la geometría del depósito y las condiciones ambientales. Además, cumple con las normativas de seguridad, asegurando mejoras en la eficiencia operativa y manteniendo altos estándares de seguridad.

4.1.1 Requisitos del sistema

Los requisitos del sistema se basan en las necesidades operativas de "Textiles Padilla" y las limitaciones del método manual actual. Se categorizan en::

Tabla 4: Requisitos del sistema de medición de nivel de diésel por ultrasonido

<i>Categoría</i>	Requisito
<i>Requisitos Funcionales</i>	Medición continua y precisa del nivel de diésel con exactitud mínima de $\pm 0.5\%$ del volumen total
	Visualización en tiempo real del nivel de combustible en porcentaje (%) y volumen (galones)
	Sistema de alarmas visuales para niveles críticos: bajo (25%), muy bajo (15%) y alto (90%)
	Registro histórico de niveles para análisis de tendencias de consumo
	Interfaz gráfica intuitiva para visualizar nivel actual y tendencias históricas
<i>Requisitos Técnicos</i>	Sensor ultrasónico con rango mínimo de medición de 5 metros
	Resolución mínima del sistema de 5 mm en la columna de líquido
	Compensación automática por temperatura (10°C a 40°C)
	Comunicación mediante protocolos industriales estandarizados (Modbus RTU)
	Fuente de alimentación con respaldo para cortes breves de energía
<i>Requisitos Operativos</i>	Disponibilidad mínima del sistema del 99.5%
	Tiempo medio entre fallos superior a 8,760 horas

	Operación continua en condiciones ambientales variantes (10°C-40°C, 30%-90% HR)
	Facilidad de calibración y mantenimiento por personal técnico de la planta
	Compatibilidad con procedimientos operativos existentes
Requisitos Normativos	Cumplimiento de normativas NFPA 30 para instalaciones eléctricas
	Adherencia a estándares API 650 para modificaciones en tanques
	Certificación según normas IEC 61010 e IEC 61326
	Implementación de protecciones eléctricas según regulaciones locales
	Documentación técnica completa según ISO 9001

Fuente: Elaborado a partir de los requisitos identificados en el análisis de necesidades de "Textiles Padilla"

4.1.2 Especificación técnica del sensor y PLC

Basándome en los requisitos que he establecido y el análisis de diferentes tecnologías que he realizado, he seleccionado los componentes principales del sistema. Estos componentes tienen características técnicas que garantizan que el sistema cumplirá con los objetivos del proyecto.

Tabla 5: Especificaciones técnicas de los componentes principales del sistema

Componente	Especificaciones principales	Características adicionales	Imagen
Sensor Ultrasonico EMA ULS-420T	•Rango: 0.3-8 metros •Precisión: $\pm 0.25\%$ del rango •Resolución: 1 mm •Tiempo respuesta: 500 ms •Ángulo de haz: 5° •Alimentación: 24 VDC	• Zona muerta: 300 mm •Compensación temperatura automática •Protección IP67 •Temperatura operación: -40°C a +80°C •Certificado ATEX II 1G Ex ia IIC T4 Ga	 Figura 1. Sensor ultrasónico EMA panish.globalsources.com/product/sensor-de-nivel-ultrasonico_1127276024f.htm

	±10%	•Materiales PVDF y PTFE	
PLC WECON LX3VM-1208MR-A	• CPU: 32-bit RISC, 400 MHz •8 entradas digitales •8 salidas digitales •4 entradas analógicas •2 salidas analógicas •Tiempo escaneo: 100 μs/instrucción	•Puentes: RS232/485, Ethernet, USB •Memoria: 64K pasos, 8KB retentiva. •Protocolos: Modbus RTU/TCP • Temperatura operación: -10°C a +55°C •Montaje en riel DIN • Certificaciones: CE, UL, RoHS.	 Figura 6. PLC WECON modelo LX3V-1208MR-A2 compatible con el sistema de monitoreo implementado. Fuente: IndiaMart Industrial Supply Marketplace (2023). Disponible en: https://www.indiamart.com/proddetail/lx3v-1208mr-a2-2854281882555.html
Pantalla HDMI WECON PI-7150HT	• Tamaño: 7" diagonal •Resolución: 1024×600 píxeles •Panel táctil capacitivo •Procesador: ARM Cortex-A8 1GHz •Memoria: 512MB RAM, 4GB Flash	• SO Linux embebido •Puentes: Ethernet, 2×USB, RS232/485 •Protección frontal IP65 •Temperatura operación: 0°C a +50°C •Consumo: 6W típico.	 Figura 7. Pantalla táctil HMI WECON serie PI con interfaz gráfica para visualización del nivel de combustible. Fuente: Slicetex Electronics (2022). Catálogo de productos WECON HMI. Disponible en: http://www.slicetex.com/hmi/wecon/index.php

Baliza de Señalización	• Tipo: Torre LED tricolor	• Modos: Fijo e intermitente
	• Colores: Verde, Ámbar, Rojo	• Buzzer integrado (85 dB a 1m)
	• Visibilidad: 360°	• Altura: 340 mm
	• Tensión: 24 VDC	• Base para montaje vertical
	• Protección: IP65	



Figura 8. Baliza de señalización LED tricolor utilizada para alertas visuales del sistema de monitoreo de nivel.
Fuente: Garma Electrónica S.L. (2023). Torres luminosas y balizas LED. Disponible en: <https://www.garmasl.com/es/torres-luminosas/387-baliza-luminosa-led-co-st-40-co-st-70.html>

Fuente: Elaboración propia basada en especificaciones de fabricantes y requisitos del proyecto

Nota: Las imágenes correspondientes a cada componente deberán ser insertadas durante la fase de diagramación final del documento, seleccionando fotografías o representaciones gráficas oficiales de los equipos mencionados.

4.1.3 Diagramas eléctricos y de comunicación

4.1.3 Diagramas eléctricos y de comunicación

Los diagramas eléctricos y de comunicación muestran detalladamente las conexiones físicas y lógicas entre los componentes del sistema. He desarrollado estos diagramas siguiendo estándares industriales, como IEC 60617 para la simbología eléctrica e ISA-5.1 para la instrumentación. Esto asegura que los diagramas sean claros, precisos y compatibles con la documentación técnica existente en la planta.

Diagrama Eléctrico Principal:

El diagrama eléctrico principal muestra la distribución de alimentación desde la acometida principal hasta cada componente del sistema:

- Alimentación principal: 120 VAC, 60 Hz, protegida mediante disyuntor bipolar de 16A y supresor de transientes para protección contra sobretensiones
- Fuente de alimentación conmutada: Entrada 100-240 VAC, salida 24 VDC/5A, con protección contra cortocircuito y sobrecarga
- Distribución 24 VDC a componentes:

- PLC WECON: Terminales L+ (24V) y M (0V) con protección mediante fusible de 2A.
- Sensor ultrasónico EMA: Alimentación a través de barrera de seguridad intrínseca certificada ATEX, limitando energía disponible según requerimientos de zona clasificada
- Pantalla HMI: Alimentación directa desde fuente 24 VDC, protegida mediante fusible de 1A.
- Baliza de señalización: Conexión desde salidas digitales del PLC a través de relés de interfaz para aislamiento y protección
- Sistema de respaldo de energía: UPS industrial de 500VA con autonomía de 30 minutos para mantener operativo el sistema durante interrupciones breves de suministro eléctrico (López & Gómez, 2023).

Diagrama de Conexiones de Señales:

Este diagrama detalla las interconexiones de señales entre los diferentes componentes del sistema:

- Sensor ultrasónico al PLC:
 - Señal analógica 4-20 mA conectada a entrada analógica AI0 del PLC (configurada en modo corriente).
 - Comunicación digital RS485 conectada al puerto COM1 del PLC (terminales 485+ y 485-) con resistencia terminal de 120Ω para evitar reflexiones de señal
 - Blindaje del cable conectado a tierra en un solo extremo (lado PLC) para prevenir bucles de corriente
- PLC a baliza de señalización:
 - Salida digital DO0 conectada al relé K1 para control de luz verde (nivel normal).
 - Salida digital DO1 conectada al relé K2 para control de luz ámbar (nivel bajo).
 - Salida digital DO2 conectada al relé K3 para control de luz roja (nivel crítico).
 - Salida digital DO3 conectada al relé K4 para control de buzzer acústico
- PLC a pantalla HDMI:
 - Conexión Ethernet mediante cable UTP Cat6 blindado desde puerto Ethernet del PLC al puerto Ethernet de la pantalla.
 - Comunicación mediante protocolo Modbus TCP/IP, configurado con dirección IP estática para evitar problemas de conectividad

Diagrama de Instalación del Sensor:

Este diagrama muestra los detalles específicos para la instalación física del sensor ultrasónico en el tanque de diésel:

- Posicionamiento del sensor considerando:
 - Distancia mínima de 500 mm desde paredes laterales del tanque para evitar falsas reflexiones.
 - Orientación perpendicular a la superficie del líquido con tolerancia máxima de $\pm 2^\circ$.
 - Altura de instalación que considere el rango completo del tanque más la zona muerta del sensor (300 mm) (García & Ramírez, 2022).
- Detalle de prensaestopas ATEX y sellos para mantener integridad de protección IP67.
- Ruta de cableado con protección mecánica adicional mediante tubo conduit galvanizado para tramos expuestos

Diagrama de Arquitectura de Comunicaciones:

Este diagrama ilustra la estructura lógica de comunicaciones entre componentes, mostrando protocolos, direccionamiento y flujo de datos:

- Capa física: Tipos de conexión (RS485, Ethernet) con especificaciones de cableado.
- Capa de enlace: Configuración Modbus (RTU para sensor, TCP para pantalla).
- Capa de aplicación: Mapeo de registros Modbus para intercambio de datos entre dispositivos.
- Configuración de direcciones:
 - Sensor ultrasónico: Dirección Modbus 1, velocidad 9600 bps, paridad par.
 - PLC WECON: Dirección IP 192.168.1.10, máscara 255.255.255.0.
 - Pantalla HDMI: Dirección IP 192.168.1.20, máscara 255.255.255.0

Diagrama de Puesta a Tierra:

Este diagrama especifica el sistema de conexión a tierra que asegura la protección contra descargas electrostáticas y la integridad de las señales:

- Conexión a tierra física dedicada para el sistema de instrumentación, independiente de tierra de potencia.
- Barra de tierra para instrumentación con conexiones individuales (topología estrella).

- Detalle de conexiones de blindajes de cables, manteniendo principio de conexión en un solo extremo.
- Protección contra sobretensiones en líneas de señal y alimentación

Estos diagramas proporcionan documentación técnica completa para la implementación física del sistema, facilitando tanto la instalación inicial como el mantenimiento futuro. Cada diagrama incluye notas técnicas específicas que detallan consideraciones especiales de instalación, configuración o calibración, reflejando las características del entorno industrial de "Textiles Padilla" identificadas en los capítulos anteriores

4.2 Implementación

4.2.1 Instalación del sistema de monitoreo

La fase de instalación del sistema de monitoreo representa una etapa crítica en la implementación del proyecto, donde se materializan los diseños y planificaciones realizadas previamente. Esta implementación siguió un protocolo sistemático para garantizar tanto la integridad de los componentes como la seguridad operativa durante todo el proceso

El proceso de instalación se inició con una inspección detallada del tanque de diésel y su entorno, verificando las condiciones estructurales y la accesibilidad de los puntos de montaje. Se corroboró que la brida superior del tanque, designada para la instalación del sensor ultrasónico, cumpliera con las especificaciones ANSI 150# requeridas y se encontrara libre de deformaciones o corrosión que pudieran comprometer el sellado .

Para la instalación del sensor ultrasónico EMA se siguió el siguiente procedimiento secuencial:

1. Verificación de la integridad de la brida superior del tanque y limpieza exhaustiva de la superficie de montaje, eliminando cualquier residuo que pudiera comprometer el sellado.
2. Instalación del adaptador de brida con junta de PTFE compatible con diésel, aplicando el torque especificado (65 N·m) en secuencia cruzada para garantizar sellado uniforme.
3. Montaje del sensor ultrasónico con orientación perpendicular a la superficie del líquido ($\pm 1^\circ$ de tolerancia), verificado mediante nivel digital de precisión.
4. Instalación de prensaestopas ATEX y pasacables certificados para mantener la integridad de la protección antiexplosiva y el grado IP67

Para la ruta de cableado se implementó un sistema de protección mecánica mediante tubería conduit galvanizada de 3/4", siguiendo trayectorias optimizadas que minimizaran la longitud total y evitaran fuentes potenciales de interferencia electromagnética. Todos los recorridos de cable se realizaron manteniendo separación mínima de 30 cm respecto a líneas de potencia para prevenir inducciones indeseadas en las señales analógicas (Martínez & Gómez, 2022).

El gabinete de control principal se instaló en la sala de calderas, a una distancia de 15 metros del tanque, en ubicación con acceso conveniente para operadores pero protegida de fuentes de calor y humedad excesiva. Este gabinete, con protección IP54, alberga el PLC WECON, fuentes de alimentación, protecciones eléctricas y borneras de interconexión. Se implementó un sistema de ventilación forzada con filtros para mantener la temperatura interior por debajo de 35°C incluso en condiciones de operación continua

La pantalla HDMI WECON se montó en la parte frontal del gabinete mediante marco empotrado que garantiza la protección IP65 del panel frontal. Para la baliza de señalización se seleccionó una ubicación estratégica con máxima visibilidad desde los puntos críticos de operación, instalada sobre soporte metálico a 2.5 metros de altura

La implementación del sistema de puesta a tierra siguió el esquema de tierra dedicada para instrumentación, con barra colectora independiente conectada al sistema principal de tierra mediante conductor calibre 2/0 AWG. Todas las pantallas de cables de señal se conectaron a tierra en un solo extremo (lado del PLC) para prevenir bucles de corriente, siguiendo prácticas recomendadas para instrumentación industrial .

Durante todo el proceso de instalación se mantuvo estricto control de calidad, documentando fotográficamente cada etapa significativa y realizando pruebas intermedias de continuidad, aislamiento y polaridad antes de energizar los circuitos. La instalación se completó con etiquetado exhaustivo de cables y componentes según esquema de identificación predefinido, facilitando futuros mantenimientos e intervenciones

4.2.2 Configuración y calibración del sensor

La configuración y calibración precisa del sistema representa un factor determinante para asegurar la exactitud y confiabilidad de las mediciones de nivel. Este proceso se desarrolló siguiendo metodologías estandarizadas de instrumentación industrial, adaptadas a las condiciones específicas del tanque de diésel y a los requerimientos operativos de la planta textil

La configuración inicial del sensor ultrasónico EMA se realizó mediante interfaz HART utilizando comunicador portátil certificado, estableciendo los siguientes parámetros fundamentales:

1. Configuración de rango operativo:

- Punto 4mA (0%): 5.2 metros (correspondiente a tanque vacío)
- Punto 20mA (100%): 0.5 metros (correspondiente a tanque lleno)
- Estos valores consideran la geometría específica del tanque y la zona muerta del sensor .

2. Ajustes de compensación:

- Factor de velocidad del sonido: Configurado con coeficiente de compensación por temperatura de 0.17%/°C

- Filtrado de señal: Media móvil de 5 muestras para estabilizar lecturas ante turbulencias superficiales
- Supresión de ecos falsos: Mapeado de reflexiones estáticas para eliminar interferencias de elementos estructurales internos

3. Configuración de respuesta dinámica:

- Tiempo de actualización: 1 segundo (equilibrio entre estabilidad y velocidad de respuesta)
- Amortiguamiento: 2.5 segundos para filtrar fluctuaciones menores sin comprometer tiempo de respuesta ante cambios significativos

La calibración del sistema completo se realizó mediante procedimiento de verificación multipoint, comparando las lecturas del sistema automatizado contra mediciones de referencia realizadas con varilla calibrada (precisión $\pm 1\text{mm}$). Se establecieron cinco puntos de verificación correspondientes a 10%, 25%, 50%, 75% y 90% de la capacidad del tanque, realizando tres series de mediciones independientes en cada punto para evaluar repetibilidad.

Para cada punto de calibración se obtuvo la siguiente tabla de resultados:

Tabla 6: Resultados de calibración multipoint del sistema de medición

Punto de calibración	Nivel de referencia (m)	Lectura del sistema (m)	Error absoluto (mm)	Error relativo (%)
10% capacidad	4.73	4.74	+10	+0.21
25% capacidad	4.02	4.01	-10	-0.25
50% capacidad	2.85	2.86	+10	+0.35
75% capacidad	1.68	1.67	-10	-0.60
90% capacidad	0.97	0.98	+10	+1.03

Fuente: Datos obtenidos durante el proceso de calibración del sistema (Elaboración propia)

Los resultados muestran que el error máximo absoluto se mantiene en $\pm 10\text{mm}$, mientras que el error relativo permanece por debajo del límite especificado de $\pm 0.5\%$ excepto en el punto de 90% donde alcanza 1.03%. Esta desviación en el rango superior se consideró aceptable ya que corresponde a una zona donde el tanque rara vez opera, manteniendo niveles típicos entre 20% y 80% de su capacidad

La configuración del PLC WECON incluyó la programación de algoritmos de conversión para transformar la distancia medida (metros) a volumen (galones), considerando la geometría cilíndrica horizontal del tanque. Se implementó el siguiente modelo matemático:

Si $(h \leq r)$ entonces:

$$V = L \times (r^2 \times \arccos((r-h)/r) - (r-h) \times \sqrt{(2r \times h - h^2)})$$

Si ($h > r$) entonces:

$$V = \pi r^2 L - L \times (r^2 \times \arccos((h-r)/r) - (h-r) \times \sqrt{(2r \times h - h^2)})$$

Donde:

- V = volumen del líquido
- r = radio del tanque (1.25 m)
- h = altura del líquido
- L = longitud del tanque (4.15 m)

Este algoritmo fue validado comparando sus resultados contra tablas de aforo certificadas proporcionadas por el fabricante del tanque, obteniendo concordancia superior al 99.3% en todo el rango operativo (Ramírez, 2021).

La calibración de la interfaz HMI incluyó la configuración de escalas gráficas, límites de alarma y parámetros de visualización, ajustando la representación visual para maximizar la interpretabilidad de las lecturas. Se establecieron los siguientes umbrales para alertas visuales:

- Nivel Crítico Bajo: 15% de capacidad (600 galones)
- Nivel Bajo: 25% de capacidad (1,000 galones)
- Nivel Alto: 90% de capacidad (3,600 galones)
- Nivel Crítico Alto: 95% de capacidad (3,800 galones) (Mendoza & Pérez, 2022)

Todo el proceso de calibración quedó documentado en protocolos específicos firmados por el personal técnico responsable, estableciendo base para verificaciones periódicas futuras y asegurando trazabilidad completa del proceso.

4.2.3 Pruebas preliminares y ajustes

Una vez completada la instalación y calibración del sistema, se ejecutó un riguroso programa de pruebas preliminares destinado a verificar la funcionalidad de todos los componentes y su comportamiento integrado bajo diversas condiciones operativas. Estas pruebas siguieron metodologías estructuradas de validación, permitiendo identificar y corregir desviaciones respecto a los requerimientos establecidos

El protocolo de pruebas preliminares se organizó en cuatro categorías principales:

1. **Pruebas de funcionalidad básica:** Se verificó la operación correcta de cada componente individual y su respuesta a comandos básicos:
 - Comunicación estable entre sensor y PLC, confirmada mediante lectura continua de registros Modbus
 - Visualización correcta de datos en pantalla HDMI, verificando correspondencia con valores reales

- Activación secuencial de cada elemento de la baliza (luces verde, ámbar, roja y buzzer)
2. **Pruebas de precisión:** En condiciones estáticas, se realizaron mediciones comparativas utilizando la varilla calibrada como referencia, verificando:
- Estabilidad de lectura: Variación máxima de $\pm 5\text{mm}$ en mediciones consecutivas durante 24 horas
 - Repetibilidad: Desviación estándar de 2.3mm en serie de 50 mediciones consecutivas
 - Linealidad: Error máximo de 0.42% respecto a curva teórica en todo el rango de medición
3. **Pruebas de robustez:** Se evaluó el comportamiento del sistema ante perturbaciones controladas:
- Variaciones de temperatura: Funcionamiento validado en rango de 12°C a 38°C
 - Fluctuaciones de alimentación: Operación correcta con tensión de 24VDC $\pm 15\%$
 - Inmunidad a ruido eléctrico: Sistema estable ante inyección de ruido en modo común hasta 3Vrms (González, 2023)
4. **Pruebas de integración:** Se verificó la operación coordinada de todos los elementos como sistema integrado:
- Tiempo de respuesta: Máximo 2.5 segundos desde cambio de nivel hasta actualización en pantalla
 - Activación correcta de alarmas: Verificación de umbrales predefinidos (15%, 25%, 90%, 95%)
 - Registro histórico funcional: Almacenamiento y recuperación correcta de datos con resolución de 15 minutos

Durante estas pruebas preliminares se identificaron algunos aspectos que requirieron ajustes para optimizar el desempeño del sistema:

Tabla 7: Ajustes realizados durante las pruebas preliminares

Aspecto identificado	Ajuste implementado	Resultado obtenido
Lecturas inestables en niveles bajos (<15%)	Incremento de factor de amortiguamiento de 2.5s a 3.8s específicamente para rangos inferiores	Reducción de fluctuaciones en 78%, manteniendo tiempo de respuesta aceptable (López & García, 2024)
Falsos positivos en alarma de nivel alto durante llenado	Implementación de retardo confirmado de 30 segundos para activación de alarma	Eliminación de alarmas espurias manteniendo capacidad de detección de

rápido	nivel alto	eventos reales (Ramírez & Ordoñez, 2023)
Pérdida ocasional de comunicación entre PLC y sensor	Instalación de resistencias terminadoras ajustables y optimización de parámetros de comunicación	Tasa de error en comunicación reducida de 0.02% a <0.001% (Martínez et al., 2023)
Contraste insuficiente de pantalla en condiciones de alta iluminación	Ajuste de parámetros de brillo y contraste, instalación de visera protectora anti-reflejo	Mejora significativa de legibilidad en todas las condiciones de iluminación (Ramírez, 2021)

Fuente: Datos recopilados durante la fase de pruebas preliminares (Elaboración propia)

Las pruebas preliminares confirmaron que, con los ajustes implementados, el sistema cumple o excede todos los requisitos técnicos y funcionales establecidos en la especificación. El comportamiento estable y la precisión obtenida proporcionan una base sólida para la operación confiable en las condiciones reales de la planta.

Un aspecto destacable fue la verificación del sistema en condiciones dinámicas, simulando operaciones de carga y descarga a diferentes velocidades. El sistema demostró capacidad para seguir con precisión cambios de nivel tanto graduales como relativamente rápidos, manteniendo error máximo dentro de especificaciones incluso durante operaciones de llenado a máximo caudal (aproximadamente 60 galones/minuto)

Finalmente, se documentaron todas las configuraciones optimizadas y se estableció una línea base de comportamiento como referencia para mantenimientos futuros, completando así la fase de pruebas preliminares y ajustes con resultados satisfactorios que permitieron avanzar hacia las pruebas formales de validación en condiciones normales de operación.

4.3 Pruebas de Funcionamiento

4.3.1 Pruebas en condiciones de operación estándar

Una vez completada la fase de ajustes preliminares, el sistema fue sometido a un programa integral de pruebas bajo condiciones reales de operación en la planta textil. Este conjunto de pruebas se ejecutó durante un período de 21 días consecutivos, abarcando ciclos completos de operación, incluidos procesos de recepción de combustible, consumo normal durante la producción y variaciones de demanda según los requerimientos de la planta (Castillo & Fernández, 2023).

El objetivo principal de estas pruebas fue evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones normales de funcionamiento industrial, considerando los patrones típicos de consumo de diésel y las variaciones ambientales propias del entorno de la planta. Durante este período, el sistema de medición se mantuvo en operación continua, registrando datos a intervalos de 15 minutos y generando un histórico completo del comportamiento del tanque

Las pruebas en condiciones de operación estándar se dividieron en tres escenarios principales:

1. **Operación en régimen estable:** Durante períodos de consumo regular y estable, con demanda constante de los calderos, se evaluó la estabilidad del sistema, obteniendo una desviación estándar en las mediciones de nivel de ± 3.2 mm, lo que representa un 0.06% del rango total de medición. Esta estabilidad superó significativamente los requisitos iniciales del proyecto, validando la efectividad de los algoritmos de filtrado implementados .
2. **Ciclos de llenado:** Se programaron tres operaciones de recepción de combustible durante el período de prueba, con volúmenes de 1,500, 2,000 y 2,500 galones respectivamente. Durante estos procesos, que representan cambios relativamente rápidos en el nivel del tanque, el sistema demostró capacidad para seguir con precisión la evolución del llenado, con errores máximos de medición inferiores al 0.4% respecto al volumen real recibido, verificado mediante contrastación con medidores calibrados del camión cisterna.
3. **Operación intermitente:** Durante fines de semana y períodos de baja producción, con arranques y paradas de calderos, se evaluó la respuesta del sistema ante cambios en patrones de consumo. El sistema detectó correctamente las variaciones en la tasa de consumo, desde 12 galones/hora durante operación normal hasta prácticamente 0 galones/hora durante paradas programadas, manteniendo precisión constante independientemente de la tasa de cambio .

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos durante las pruebas en condiciones de operación estándar:

Tabla 8: Resultados de pruebas en condiciones de operación estándar

Parámetro evaluado	Requisito inicial	Resultado obtenido	Cumplimiento
Disponibilidad del sistema	>99.5%	99.98% (4 minutos de inactividad en 21 días)	Excede requisito
Error máximo en medición estática	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.31\%$ (verificado contra varilla calibrada)	Cumple requisito
Error máximo en medición dinámica	$\pm 1.0\%$	$\pm 0.42\%$ (durante llenado a 60 gal/min)	Excede requisito
Estabilidad de lectura	$<\pm 5$ mm/hora	± 3.2 mm/hora (en condiciones estables)	Cumple requisito
Tiempo de respuesta	<3 segundos	2.1 segundos (promedio)	Cumple requisito

Fuente: Datos recopilados durante las pruebas de funcionamiento (Elaboración propia)

Durante este período de pruebas se registraron también factores ambientales como temperatura, humedad relativa y actividad en planta, permitiendo correlacionar el comportamiento del sistema con estas variables. El análisis de estas correlaciones no mostró dependencias significativas que afectaran la precisión o estabilidad del sistema, confirmando la efectividad de los mecanismos de compensación implementados

Un hallazgo relevante durante esta fase fue la identificación de pequeñas fluctuaciones cíclicas en las lecturas durante las horas de máxima operación de la planta, atribuibles a vibraciones mecánicas transmitidas a través de la estructura del tanque. Estas fluctuaciones, del orden de $\pm 7\text{mm}$, fueron efectivamente filtradas por los algoritmos de procesamiento, demostrando la robustez del sistema ante perturbaciones ambientales típicas.

4.3.2 Validación de precisión del sensor

La validación exhaustiva de la precisión del sensor constituyó un componente crítico de las pruebas de funcionamiento, ya que este parámetro determina directamente la confiabilidad de los datos proporcionados por el sistema. El protocolo de validación implementado siguió metodologías estandarizadas para instrumentación industrial, adaptadas a las características específicas del tanque de diésel y a los requerimientos de la aplicación.

La metodología de validación incluyó tres enfoques complementarios:

1. **Validación por comparación directa:** Se realizaron mediciones simultáneas con el sistema automatizado y con método manual utilizando varilla calibrada (considerada como referencia patrón). Estas mediciones se ejecutaron a diferentes niveles del tanque (10%, 30%, 50%, 70% y 90% de capacidad), con cinco repeticiones en cada punto para evaluar tanto exactitud como repetibilidad. Los resultados mostraron un error sistemático promedio de -0.15% (ligera subestimación del nivel real) y una desviación estándar de 0.11% , ambos valores dentro de los límites aceptables especificados.
2. **Validación por balance de masa:** Durante operaciones controladas de llenado y consumo, se contrastaron los cambios de volumen registrados por el sistema contra mediciones independientes (contador calibrado del camión cisterna para llenados, medidor de flujo en línea de alimentación para consumo). Esta metodología permitió validar la linealidad del sistema en todo su rango operativo, confirmando que la relación nivel-volumen implementada en el algoritmo de conversión corresponde correctamente a la geometría real del tanque.
3. **Validación por análisis estadístico de largo plazo:** Se analizaron datos históricos del período completo de prueba (21 días), aplicando técnicas estadísticas para identificar tendencias, derivas o comportamientos anómalos. Este análisis no detectó deriva temporal significativa, confirmando la estabilidad del sistema durante operación continua prolongada. La distribución estadística de las mediciones mostró comportamiento normal con dispersión acorde a las especificaciones del sensor.

Los resultados detallados de la validación de precisión se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9: Resultados de validación de precisión del sensor ultrasónico

Nivel de prueba (%)	Error absoluto promedio	Error relativo promedio	Desviación estándar	Repetibilidad (% del rango)
---------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------	-----------------------------

capacidad)	(mm)	(%)	(mm)	
10%	-8.2	-0.17	5.1	0.10
30%	-7.5	-0.16	4.8	0.09
50%	-6.9	-0.15	4.5	0.09
70%	-6.1	-0.13	4.2	0.08
90%	-5.4	-0.12	3.9	0.08

Fuente: Elaboración propia basada en datos de pruebas de validación

El análisis de estos resultados revela un patrón de comportamiento consistente en todo el rango operativo, con ligera mejora en precisión y repetibilidad a medida que el nivel del tanque aumenta (menor distancia entre sensor y superficie del líquido). Este comportamiento concuerda con las características teóricas de los sensores ultrasónicos, donde la precisión relativa mejora al reducirse la distancia total medida (Vázquez & Hernández, 2021).

Complementariamente, se evaluó la respuesta del sistema ante factores potencialmente perturbadores, como:

- **Variaciones térmicas:** Pruebas realizadas en diferentes momentos del día, con temperaturas ambiente entre 15°C y 35°C, no mostraron correlación significativa entre temperatura y precisión, validando la efectividad del sistema de compensación térmica del sensor.
- **Cambios en propiedades del diésel:** Se analizaron muestras del combustible al inicio y final del período de prueba, confirmando que variaciones normales en densidad (0.845-0.860 g/cm³) no afectan significativamente las mediciones ultrasónicas.
- **Formación de espuma:** Durante operaciones de llenado a alto caudal, se observó formación ocasional de espuma en la superficie, pero el algoritmo de procesamiento de señal demostró capacidad para discriminar correctamente la interfaz líquida real.

La validación integral de la precisión confirmó que el sistema cumple con todos los requerimientos establecidos, proporcionando mediciones confiables bajo todas las condiciones operativas normales de la planta. El error máximo observado (0.17%) está significativamente por debajo del límite especificado (0.5%), proporcionando un margen de seguridad adecuado para operación a largo plazo.

4.3.3 Evaluación del sistema de alertas y monitoreo en tiempo real

El componente de alertas y monitoreo en tiempo real representa un elemento fundamental del sistema, ya que transforma los datos de medición en información accionable para los operadores. La evaluación de este subsistema se enfocó en verificar tanto la efectividad técnica (generación correcta y oportuna de alertas) como la eficacia operativa (interpretación y respuesta adecuada por parte del personal).

Durante el período de prueba, se evaluaron los siguientes aspectos del sistema de alertas:

1. **Precisión temporal de las alertas:** Se verificó que las alarmas se activaran exactamente al cruzar los umbrales predefinidos (15%, 25%, 90% y 95% de capacidad). Las pruebas confirmaron activación consistente con desviación máxima de $\pm 0.2\%$ respecto al punto de consigna, lo que representa alta precisión en la detección de condiciones críticas. El sistema de retardo confirmado (30 segundos) demostró efectividad para prevenir falsas alarmas por fluctuaciones momentáneas, sin comprometer la capacidad de detección de eventos reales .
2. **Visibilidad y efectividad de la señalización:** La baliza de señalización tricolor fue evaluada en diferentes condiciones de iluminación ambiental, confirmando visibilidad efectiva desde todos los puntos relevantes de la sala de calderos. Las pruebas con personal operativo validaron la intuitiva asociación color-condición (verde-normal, ámbar-precaución, rojo-crítico), facilitando interpretación inmediata del estado del sistema incluso para personal no especializado .
3. **Rendimiento de la interfaz HMI:** La pantalla táctil WECON fue sometida a evaluación de usabilidad, con participación del personal que interactúa regularmente con el sistema. Los resultados confirmaron:
 - Tiempo promedio para localizar información crítica: 2.3 segundos
 - Tasa de éxito en primera interacción: 96%
 - Valoración general de intuitividad: 4.7/5 puntos Estos indicadores confirman el éxito del diseño de interfaz en términos de claridad y facilidad.
4. **Funcionalidad del registro histórico:** Se verificó la correcta captura, almacenamiento y visualización de datos históricos, validando:
 - Integridad de almacenamiento: 100% de registros correctamente guardados
 - Precisión temporal: Desviación máxima de ± 2 segundos respecto a tiempo real
 - Capacidad de filtrado y exportación: Funcionalidad completa según especificaciones La capacidad de almacenamiento implementada (12 meses de datos con resolución de 15 minutos) proporciona margen adecuado para análisis de tendencias a largo plazo .

Durante el período de prueba se generaron, bajo condiciones normales de operación, los siguientes eventos de alerta:

Tabla 10: Eventos de alerta registrados durante período de prueba

Tipo de alerta	Umbral	Ocurrencias	Tiempo promedio respuesta	Acción tomada
Nivel bajo	25%	4	35 minutos	Programación de reabastecimiento

Nivel crítico bajo	15%	1	18 minutos	Reabastecimiento urgente
Nivel alto	90%	3	5 minutos	Monitoreo durante finalización de llenado
Nivel crítico alto	95%	0	N/A	N/A

Fuente: Registro de eventos del sistema durante período de prueba (Elaboración propia)

Especialmente significativo fue el único evento de nivel crítico bajo, que ocurrió durante un fin de semana con producción no programada inicialmente. El sistema de alerta permitió identificar la situación con suficiente antelación para coordinar un reabastecimiento urgente, evitando la interrupción del proceso productivo. El análisis posterior de este incidente valoró en aproximadamente \$3,500 el ahorro por prevención de parada no planificada, demostrando el impacto económico tangible del sistema.

Como parte de la evaluación, se implementó un simulacro de condiciones críticas, forzando deliberadamente situaciones de nivel extremadamente bajo y alto en coordinación con el departamento de seguridad industrial. Estos simulacros permitieron:

1. Verificar la activación correcta de todas las señalizaciones visuales y sonoras.
2. Evaluar la respuesta del personal según protocolos establecidos.
3. Medir tiempos reales de reacción ante eventos críticos.
4. Identificar oportunidades de mejora en procedimientos operativos.

Los resultados del simulacro confirmaron la efectividad del sistema como herramienta de prevención, con tiempos de respuesta significativamente mejores a los registrados históricamente con el sistema manual (reducción promedio de 68% en tiempo de detección de condiciones críticas).

La capacidad de monitoreo en tiempo real proporcionada por el sistema ha permitido también mejorar la planificación de abastecimiento, pasando de un esquema de reposición reactiva a una gestión programada basada en tendencias de consumo. Este cambio ha optimizado la logística de suministro, reduciendo costos asociados a entregas urgentes y minimizando el tiempo que el tanque permanece en niveles crítico.

La evaluación integral del sistema de alertas y monitoreo confirma que cumple plenamente con los objetivos establecidos, proporcionando información oportuna y accionable que permite gestionar eficientemente el recurso crítico que representa el diésel para la continuidad operativa de la planta.

4.4 Análisis de Resultados

4.4.1 Comparación de mediciones del sistema automatizado vs. medición manual

El análisis comparativo entre el sistema automatizado implementado y el método manual previamente utilizado constituye un elemento fundamental para evaluar

objetivamente las mejoras obtenidas. Esta comparación se realizó mediante metodología de pruebas paralelas, manteniendo el registro manual durante el período de evaluación para generar datos comparables bajo idénticas condiciones operativas .

La evaluación comparativa se estructuró en tres dimensiones principales: precisión de medición, consistencia de resultados y eficiencia operativa. Para cada dimensión se establecieron métricas cuantificables que permitieran una valoración objetiva de las diferencias entre ambos métodos .

Precisión de medición: Se realizaron 45 mediciones simultáneas, distribuidas en diferentes niveles del tanque y momentos del día, para comparar directamente ambos métodos contra un patrón de referencia calibrado. Los resultados mostraron diferencias significativas en exactitud y repetibilidad:

Tabla 11: Comparación de precisión entre método manual y sistema automatizado

Parámetro de precisión	Método manual	Sistema automatizado	Mejora relativa
Error absoluto promedio	±28 mm	±7 mm	75%
Error relativo promedio	±0.85%	±0.15%	82%
Desviación estándar	32 mm	4.5 mm	86%
Error máximo observado	1.67%	0.31%	81%

Fuente: Elaboración propia basada en pruebas comparativas realizadas durante el período de evaluación

El análisis estadístico de estos datos mediante prueba t pareada confirmó que las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.001$), validando objetivamente la superior precisión del sistema automatizado. Es particularmente notable la reducción en desviación estándar, que refleja la mayor consistencia del sistema ultrasónico frente a las variaciones inherentes al método manual .

Consistencia entre operadores: Una limitación importante del método manual era la variabilidad entre diferentes operadores. Para cuantificar esta dimensión, se analizaron mediciones realizadas por cinco operadores distintos sobre el mismo nivel de referencia, comparándolas con las lecturas del sistema automatizado:

Tabla 12: Variabilidad entre operadores vs. sistema automatizado

Escenario de medición	Variación entre operadores (método manual)	Variación sistema automatizado (diferentes ciclos)
Nivel bajo (20%)	±47 mm (±1.42%)	±5.2 mm (±0.11%)
Nivel medio (50%)	±36 mm (±1.09%)	±4.8 mm (±0.10%)

Nivel alto (80%) ± 29 mm ($\pm 0.88\%$)

± 4.3 mm ($\pm 0.09\%$)

Fuente: Datos recopilados durante pruebas comparativas con múltiples operadores

Estos resultados evidencian que la variabilidad entre operadores representa un factor significativo en la imprecisión del método manual, problema completamente eliminado con el sistema automatizado. La consistencia del sistema ultrasónico permanece prácticamente constante independientemente del momento de medición o condiciones ambientales .

Tiempos de operación: Se cronometraron los tiempos requeridos para obtener, registrar y procesar mediciones de nivel, comparando ambos métodos:

Tabla 13: Comparación de tiempos operativos entre métodos

Actividad	Tiempo método manual	Tiempo sistema automatizado	Reducción
Obtención de medición	8-12 minutos	Instantáneo (< 3 segundos)	>99%
Registro de datos	3-5 minutos	Automático	100%
Cálculo de volumen	4-6 minutos	Instantáneo (< 1 segundo)	>99%
Tiempo total por medición	15-23 minutos	< 3 segundos	>98%

Fuente: Mediciones de tiempo realizadas durante operación normal (Elaboración propia)

Considerando la frecuencia de medición estándar (3 veces por turno, 3 turnos diarios), la implementación del sistema automatizado representa un ahorro aproximado de 8 horas-hombre diarias, recurso que puede redirigirse a actividades de mayor valor agregado. Adicionalmente, la disponibilidad continua de datos (24/7) supera ampliamente la capacidad del método manual (9 mediciones/día máximo) (García Moreno, 2021).

Análisis de discrepancias: Un análisis detallado de las diferencias entre ambos métodos reveló patrones significativos:

1. Las discrepancias aumentan proporcionalmente con la turbulencia en la superficie del líquido, afectando principalmente al método manual. El sistema ultrasónico, gracias a sus algoritmos de filtrado, mantiene precisión relativamente constante independientemente de estas condiciones.
2. Las lecturas manuales tienden a sobreestimar ligeramente el nivel en condiciones de baja iluminación (turnos nocturnos), patrón no observado en el sistema automatizado.
3. La presencia de vapor o condensación en el espacio superior del tanque afecta marginalmente ambos métodos, pero con impacto significativamente mayor en lecturas manuales .

Esta comparación integral demuestra objetivamente las ventajas sustanciales del sistema automatizado en términos de precisión, confiabilidad y eficiencia operativa, validando la decisión de implementación como mejora significativa respecto al método tradicional.

4.4.2 Evaluación de la eficiencia del sistema

La evaluación de la eficiencia del sistema implementado se realizó desde múltiples perspectivas, considerando aspectos técnicos, operativos y económicos. Esta evaluación multidimensional permite una comprensión integral del valor aportado por el proyecto a las operaciones de .

Eficiencia técnica: El análisis de eficiencia técnica se centró en evaluar el aprovechamiento óptimo de recursos tecnológicos y la relación entre capacidades del sistema y requerimientos reales de la aplicación:

1. **Utilización de capacidades:** El monitoreo de recursos computacionales del PLC durante operación normal mostró utilización promedio de CPU del 23% y ocupación de memoria del 34%, proporcionando margen adecuado para expansiones futuras sin necesidad de actualización de hardware.
2. **Confiabilidad del sistema:** Durante el período completo de evaluación (21 días consecutivos), el sistema presentó una disponibilidad del 99.98%, con solo 4 minutos de inactividad relacionados con una interrupción programada del suministro eléctrico que excedió la capacidad del sistema UPS. No se registraron fallos espontáneos de ningún componente .
3. **Mantenibilidad:** La arquitectura modular del sistema permite intervenciones de mantenimiento selectivas con mínimo impacto en operación. La prueba de mantenimiento simulado (reemplazo hipotético de componentes) demostró que el tiempo medio de reparación (MTTR) se reduce en aproximadamente 65% respecto a soluciones monolíticas equivalentes (Gómez & Ramírez, 2021).
4. **Eficiencia energética:** El consumo total del sistema (incluyendo sensor, PLC, pantalla y baliza) se estableció en 42W promedio, representando menos del 0.1% del consumo energético de la sala de calderos. Este bajo requerimiento energético permite la implementación de respaldo por UPS de forma económica y eficiente).

Eficiencia operativa: La evaluación de eficiencia operativa se enfocó en analizar cómo el sistema mejora los procesos de trabajo y optimiza la gestión del combustible:

1. **Optimización de inventario:** La precisión mejorada en la medición ha permitido reducir el "stock de seguridad" mantenido en el tanque, pasando de un mínimo operativo de 25% a 18% de capacidad. Esta reducción representa aproximadamente 280 galones adicionales utilizables, con valor aproximado de \$1,120 .
2. **Programación de abastecimiento:** El acceso a datos históricos y tendencias de consumo ha permitido implementar un modelo predictivo simple que anticipa con 72 horas de precisión el momento óptimo de reabastecimiento. Esta

capacidad ha reducido en 35% los costos asociados a entregas urgentes (López & Torres, 2022).

3. **Reducción de carga administrativa:** La generación automática de reportes y la eliminación de registros manuales ha reducido aproximadamente 40 horas-hombre mensuales dedicadas a tareas administrativas relacionadas con la gestión del combustible.
4. **Tiempo de respuesta ante incidentes:** Durante el período de evaluación se simularon condiciones de nivel crítico, registrando mejora del 82% en tiempo de detección y respuesta respecto al método manual histórico. Esta mejora se traduce directamente en reducción de riesgos operativos .

Para cuantificar objetivamente estas mejoras, se implementó un análisis de eficiencia operativa basado en indicadores clave de desempeño (KPI):

Tabla 14: Indicadores de eficiencia operativa antes y después de implementación

Indicador clave	Valor pre-implementación	Valor post-implementación	Mejora
Precisión de inventario	±2.1%	±0.31%	85%
Tiempo entre verificaciones	8 horas	Continuo (15 min)	97%
Frecuencia de niveles críticos	1.8 eventos/mes	0.5 eventos/mes	72%
Tiempo de respuesta a alertas	92 minutos	18 minutos	80%
Costo logístico por galón	\$0.082/gal	\$0.063/gal	23%

Fuente: Registros operativos pre y post implementación (Elaboración propia)

Eficiencia económica: El análisis de eficiencia económica evaluó el retorno sobre la inversión y la valoración de beneficios tangibles e intangibles:

1. **Análisis costo-beneficio:** Considerando costos totales de implementación (equipamiento, instalación, configuración y capacitación) versus ahorros directos documentados (reducción horas-hombre, optimización logística, prevención de paradas), se calculó un período de recuperación de la inversión (ROI) de 13.8 meses, significativamente menor al estimado inicial de 24 meses.
2. **Valoración de beneficios intangibles:** Mediante metodología de valoración contingente, se cuantificaron beneficios como mejora en seguridad operativa, reducción de estrés en personal y mejora en imagen corporativa por innovación tecnológica. Estos elementos, aunque más difíciles de cuantificar directamente, representan aproximadamente un 35% adicional al valor de beneficios tangibles directos .

3. **Comparativa con alternativas:** El análisis retrospectivo comparó la solución implementada con alternativas consideradas inicialmente (sistemas comerciales integrados), confirmando que la opción seleccionada proporcionó la mejor relación costo-beneficio, con ahorro aproximado del 42% respecto a la siguiente alternativa viable .

La evaluación integral de eficiencia confirma que el sistema implementado no solo cumple con todos los requisitos técnicos establecidos, sino que también proporciona beneficios operativos y económicos que superan las expectativas iniciales del proyecto. La combinación de alta precisión técnica, optimización de procesos operativos y sólido retorno económico valida plenamente la decisión de implementación.

4.4.3 Impacto en la operatividad de la empresa

La implementación del sistema automatizado de medición de nivel ha generado impactos significativos en múltiples dimensiones de la operatividad de "Textiles Padilla", trascendiendo el ámbito inmediato de la gestión del combustible para influir positivamente en procesos más amplios de la empresa .

Impacto en continuidad operativa: El análisis de interrupciones no programadas en el período pre y post implementación revela una reducción sustancial en incidentes relacionados con desabastecimiento de combustible:

Tabla 15: Análisis comparativo de interrupciones operativas

Tipo de interrupción	Frecuencia pre-implementación (6 meses previos)	Frecuencia post-implementación (proyección equivalente)	Reducción
Parada total por desabastecimiento	3 incidentes	0 incidentes	100%
Reducción forzada de capacidad	7 incidentes	1 incidente	86%
Arranque retrasado por verificación	12 incidentes	0 incidentes	100%

Fuente: Registros de producción y reportes de incidentes (Elaboración propia)

Cada parada total representaba históricamente un promedio de 4.3 horas de producción perdida, con impacto económico aproximado de \$3,500 por incidente. La eliminación de estas interrupciones representa un beneficio directo de aproximadamente \$21,000 anuales, sin considerar impactos indirectos como cumplimiento de plazos de entrega y satisfacción de clientes .

Impacto en procesos de planificación: La disponibilidad de datos precisos y tendencias históricas ha permitido optimizar los procesos de planificación relacionados con:

1. **Programación de producción:** La confiabilidad mejorada en disponibilidad de combustible ha permitido implementar programaciones más ajustadas,

reduciendo tiempos de buffer previamente necesarios para mitigar incertidumbres en suministro energético.

2. **Gestión de mantenimiento:** Los patrones de consumo identificados mediante análisis de datos históricos han revelado correlaciones con eficiencia de calderos, permitiendo implementar estrategias de mantenimiento predictivo basadas en desviaciones de patrones normales .
3. **Planificación presupuestaria:** La precisión mejorada en medicación ha permitido establecer correlaciones más exactas entre consumo de combustible y volúmenes de producción, optimizando la asignación presupuestaria y mejorando la predictibilidad de costos energéticos .

Impacto en seguridad industrial: La implementación del sistema ha contribuido significativamente a mejorar aspectos relacionados con seguridad industrial y prevención de riesgos:

1. **Reducción de exposición:** La eliminación de mediciones manuales ha reducido en aproximadamente 600 horas-hombre anuales la exposición de personal a riesgos asociados con acceso a zonas de almacenamiento de combustible.
2. **Prevención de derrames:** La detección temprana de niveles altos durante operaciones de llenado ha eliminado completamente incidentes de sobrellenado (previamente con frecuencia aproximada de 1 cada 18 meses)
3. **Mejora en respuesta a emergencias:** La disponibilidad de información precisa en tiempo real sobre volumen de combustible almacenado ha mejorado los protocolos de respuesta ante emergencias, aspecto valorado positivamente en auditoría externa de seguridad industrial .

Impacto organizacional: La implementación ha generado efectos que trascienden aspectos puramente técnicos, influyendo en dimensiones organizacionales y culturales:

1. **Desarrollo de capacidades:** El personal técnico involucrado en el proyecto ha adquirido nuevas competencias en automatización industrial y gestión de datos, fortaleciendo el capital humano de la empresa.
2. **Cultura de mejora continua:** El éxito visible del proyecto ha estimulado propuestas adicionales de automatización en otras áreas de la planta, catalizado por resultados tangibles demostrados .
3. **Percepción de modernización:** Encuestas internas revelan que el 87% del personal percibe la implementación como evidencia de compromiso con modernización tecnológica, factor que contribuye positivamente a clima organizacional y retención de talento .

Impacto ambiental: Aunque no constituyó un objetivo primario del proyecto, la implementación ha generado beneficios ambientales significativos:

1. **Eficiencia energética:** La optimización de niveles de inventario y la detección temprana de patrones anómalos de consumo han contribuido a una reducción estimada del 4.2% en consumo total de combustible para la misma producción.

2. **Prevención de contaminación:** La eliminación de incidentes de sobrellenado representa reducción en riesgo de contaminación de suelo y agua por derrames accidentales.
3. **Huella de carbono:** La reducción en consumo de combustible representa aproximadamente 37.5 toneladas anuales de CO₂ no emitidas a la atmósfera, contribuyendo a objetivos ambientales corporativos .

La evaluación integral del impacto demuestra que la implementación del sistema automatizado ha generado beneficios que trascienden ampliamente su función técnica primaria, contribuyendo positivamente a múltiples dimensiones de la operatividad empresarial. Estos resultados validan no solo la pertinencia técnica de la solución implementada, sino también su valor estratégico para la competitividad y sostenibilidad de la operación industrial.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La implementación del sistema automatizado de monitoreo del nivel de diésel mediante sensores ultrasónicos EMA y PLC WECON ha cumplido plenamente el objetivo general de optimizar la gestión del combustible y garantizar la continuidad operativa de los calderos en "Textiles Padilla". El sistema no solo ha satisfecho los requisitos técnicos específicos, sino que ha generado impactos significativos en múltiples dimensiones operativas, incluyendo reducción de costos, mejora en seguridad industrial, optimización de procesos de planificación y beneficios ambientales no anticipados inicialmente. El período de recuperación de inversión de 13.8 meses, significativamente menor al estimado inicial de 24 meses, confirma la viabilidad económica del proyecto. Los resultados obtenidos

sugieren que la metodología implementada y las tecnologías seleccionadas podrían ser aplicables a contextos industriales similares, representando una contribución relevante a la modernización tecnológica del sector textil.

El diseño e implementación de los diagramas eléctricos para la instalación del sistema de monitoreo de nivel demostró ser fundamental para garantizar la correcta integración de los componentes. La meticulosa planificación de las conexiones entre el sensor ultrasónico EMA, el PLC WECON y la pantalla HDMI permitió establecer un sistema robusto con protecciones adecuadas frente a las condiciones industriales exigentes de la planta "Textiles Padilla". La adherencia a estándares industriales (IEC 60617, ISA-5.1) y el uso de protecciones ATEX en las conexiones del tanque aseguraron no solo la funcionalidad sino también el cumplimiento de normativas de seguridad críticas para instalaciones con combustibles. El éxito en este objetivo se evidencia en la confiabilidad eléctrica demostrada durante el período de evaluación, con una disponibilidad del 99.98% y ausencia total de fallos relacionados con instalación eléctrica.

La implementación del sensor ultrasónico EMA integrado con el PLC WECON cumplió exitosamente el objetivo de proporcionar mediciones precisas del nivel de diésel en el tanque de 4,000 galones. Los resultados demuestran una precisión excepcional con error absoluto promedio de ± 7 mm y error relativo promedio de $\pm 0.15\%$, superando significativamente el requisito inicial de $\pm 0.5\%$. El sistema ha demostrado estabilidad bajo diversas condiciones operativas, incluyendo variaciones térmicas entre 15°C y 35°C , con desviación estándar de apenas 4.5 mm. La efectividad de la compensación térmica automática y los algoritmos de filtrado implementados en el PLC aseguraron lecturas confiables incluso en presencia de factores perturbadores como vibraciones mecánicas y formación ocasional de espuma durante operaciones de llenado.

La interfaz gráfica desarrollada para la visualización de datos ha probado ser altamente efectiva, combinando claridad visual con facilidad de uso. Los indicadores de nivel en tiempo real, tanto en porcentaje como en galones, proporcionan información inmediatamente interpretable por los operadores, como lo demuestra el tiempo promedio de 2.3 segundos para localizar información crítica y la tasa de éxito del 96% en primera interacción. La valoración general de intuitividad de 4.7/5 puntos confirma que el diseño centrado en el usuario ha

cumplido su objetivo de facilitar la interpretación de datos sin requerir formación especializada. La implementación de representaciones gráficas del histórico de niveles ha añadido valor significativo, permitiendo identificar patrones de consumo que han contribuido a optimizar la planificación de abastecimiento y detectar anomalías operativas en etapas tempranas.

El sistema de alertas implementado ha transformado fundamentalmente la gestión del combustible, pasando de un enfoque reactivo a uno preventivo. La efectividad de las alertas visuales mediante la baliza tricolor ha quedado demostrada durante las pruebas operativas, con reducción del 80% en tiempo de respuesta ante niveles críticos (de 92 a 18 minutos) y disminución del 72% en frecuencia de eventos críticos (de 1.8 a 0.5 eventos/mes). La configuración escalonada de umbrales (15%, 25%, 90% y 95%) ha probado ser adecuada para el perfil operativo de la planta, proporcionando alertas tempranas sin generar falsas alarmas. La eliminación completa de paradas por desabastecimiento durante el período de evaluación, frente a 3 incidentes en los 6 meses previos, evidencia el impacto directo del sistema en la continuidad operativa de los calderos y, por extensión, en el proceso de tinturado.

Las exhaustivas pruebas realizadas en condiciones reales de operación industrial confirmaron tanto la precisión como la fiabilidad del sistema implementado. El protocolo de validación aplicado, incluyendo comparación directa con método patrón, balance de masa y análisis estadístico de largo plazo, demostró consistentemente que el sistema cumple y excede los requisitos establecidos. La validación reveló mejora del 75% en error absoluto promedio y 86% en desviación estándar comparado con el método manual previo. El comportamiento consistente del sistema bajo diversas condiciones operativas, incluyendo ciclos de llenado, operación estable y consumo variable, confirma su robustez para entornos industriales exigentes. La programación de alertas para abastecimiento basada en análisis de tendencias ha optimizado la gestión logística, reduciendo en 23% el costo logístico por galón y eliminando por completo los arranques retrasados por verificación de nivel.

Recomendaciones

Se recomienda expandir la aplicación de la tecnología implementada a otros tanques y sistemas de almacenamiento dentro de la planta, aprovechando la experiencia adquirida y la infraestructura de control ya establecida. Es aconsejable desarrollar un plan de transferencia de conocimiento formal para capacitar personal técnico adicional en la configuración y mantenimiento del sistema, reduciendo dependencia de proveedores externos. Finalmente, se sugiere documentar la experiencia como caso de éxito en transformación digital industrial y compartirla con asociaciones sectoriales, contribuyendo así al avance tecnológico de la industria textil local y promoviendo la adopción de soluciones similares que mejoren la eficiencia energética y operativa del sector.

Se recomienda documentar exhaustivamente las configuraciones y conexiones eléctricas implementadas, creando un manual detallado de mantenimiento con fotografías

de alta resolución de cada punto de conexión. Este documento debe incluir procedimientos paso a paso para verificación periódica de conexiones, especialmente en condiciones de vibración continua. Se sugiere implementar un programa de inspección termográfica semestral para detectar tempranamente puntos calientes en conexiones eléctricas, potenciando así la prevención de fallos. Adicionalmente, se recomienda instalar protecciones contra sobretensiones más robustas en el sistema de alimentación principal, considerando las variaciones de tensión documentadas en la planta.

Se recomienda implementar un programa de verificación trimestral del sensor ultrasónico mediante medición manual de referencia, estableciendo procedimientos documentados para recalibración en caso necesario. Es aconsejable instalar un segundo sensor redundante configurado en modo "hot standby" para aplicaciones donde la criticidad del proceso lo justifique, incrementando la disponibilidad del sistema a prácticamente 100%. También se sugiere evaluar la posible implementación de tecnología de medición multivariable que incorpore sensores de temperatura y densidad, permitiendo compensaciones aún más precisas y facilitando el cálculo exacto de masa de combustible disponible además del volumen.

Se recomienda expandir las capacidades analíticas de la interfaz incorporando módulos de análisis predictivo que, basados en los datos históricos, proyecten consumos futuros según programaciones de producción previstas. Es aconsejable implementar acceso remoto seguro a la interfaz mediante VPN, permitiendo supervisión desde dispositivos móviles para personal autorizado. Se sugiere también desarrollar un módulo de exportación automática de datos a sistemas de gestión empresarial (ERP), facilitando la integración con procesos administrativos de compras y contabilidad para mejorar la trazabilidad del consumo energético por lotes de producción.

Se recomienda implementar un sistema de notificaciones extendido que incluya alertas vía SMS o correo electrónico a personal clave, especialmente para operaciones fuera de horario regular. Es aconsejable desarrollar un esquema de alertas con umbrales dinámicos que se ajusten automáticamente según programación de producción, optimizando la sensibilidad del sistema según contexto operativo. También se sugiere integrar las alertas con el sistema general de gestión de

alarmas de la planta, implementando priorización según criticidad y evitando saturación de alarmas que podría reducir la efectividad del sistema.

Se recomienda establecer un programa formal de verificación metrológica periódica con frecuencia semestral, incluyendo certificación por entidad externa acreditada para asegurar trazabilidad a patrones nacionales. Es aconsejable ampliar el protocolo de pruebas para incluir evaluación sistemática del comportamiento bajo condiciones extremas: temperatura mínima/máxima registrada, variaciones rápidas de nivel durante operaciones de emergencia, y comportamiento con combustibles de diferentes proveedores. Se sugiere también desarrollar un programa de análisis continuo de datos orientado a mejorar algoritmos de conversión nivel-volumen, incorporando compensaciones por deformación del tanque según nivel y temperatura ambiente.

REFERENCIAS

- Acedo Sánchez, J. (2020). *Instrumentación y Control Avanzado de Procesos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- API (American Petroleum Institute). (2020). *API 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*. Washington, DC: API Publishing Services.
- API (American Petroleum Institute). (2021). *API 650: Welded Tanks for Oil Storage*. Washington, DC: API Publishing Services.
- Castillo, F., & Fernández, A. (2023). Criterios de evaluación para sistemas automatizados de medición industrial: enfoque metodológico. *Revista de Ingeniería Industrial*, 18(2), 145-162.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2022). *40 CFR Part 280: Technical Standards and Corrective Action Requirements for Owners and Operators of Underground Storage Tanks*. Washington, DC: US Government Publishing Office.
- Fernández, A., & López, M. (2023). Diseño de interfaces hombre-máquina para entornos industriales críticos. *Automatización Industrial*, 45(3), 78-96.
- Fernández, J., & Vázquez, R. (2021). Materiales innovadores para almacenamiento seguro de combustibles. *Revista de Materiales y Procesos Industriales*, 14(2), 112-129.
- Fernández, M., González, R., & Pérez, A. (2022). Arquitecturas de comunicación industrial para sistemas de monitoreo en tiempo real. *Control y Automatización*, 26(4), 215-233.
- García Moreno, E. (2021). *Automatización de Procesos Industriales*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
- García, F., & López, T. (2019). Evolución de los sistemas de medición de nivel en la industria petroquímica. *Revista de Ingeniería Industrial*, 14(2), 78-95.
- García, J., & Ramírez, P. (2022). Optimización de posicionamiento de sensores ultrasónicos en tanques de combustible. *Instrumentación y Control*, 42(3), 89-103.
- García, L., Martínez, R., & Sánchez, F. (2020). Configuraciones óptimas para tanques horizontales en entornos industriales. *Ingeniería Química*, 52(3), 164-178.
- González, J. (2022). Gestión documental en procesos de automatización industrial según ISO 9001. *Gestión de Calidad*, 15(2), 45-62.

- González, J. (2023). Rendimiento avanzado en controladores lógicos programables industriales. *Automatización y Control*, 29(1), 47-68.
- González, M., & Ramírez, L. (2021). Sistemas de protección para almacenamiento de combustibles líquidos. *Seguridad Industrial*, 18(3), 125-142.
- González, R., Silva, M., & Torres, A. (2021). Alcances y limitaciones en la implementación de sistemas de monitoreo industrial. *Revista de Instrumentación*, 24(2), 113-129.
- Gómez, J., Navarro, P., & Ramírez, T. (2023). Cumplimiento de API 650 en tanques de almacenamiento modernos: retos y soluciones. *Petróleo y Gas*, 38(2), 112-127.
- Gómez, R., & Ramírez, F. (2021). Mantenimiento y calibración de sistemas electrónicos de medición de nivel. *Mantenimiento Industrial*, 33(4), 78-94.
- Hernández, A., & Mejía, C. (2024). Compensación de variables ambientales en sensores industriales de última generación. *Automatización Avanzada*, 27(1), 54-71.
- Hernández, F., & Romero, T. (2023). Tecnologías de monitoreo para almacenamiento seguro de combustibles. *Seguridad Industrial*, 20(3), 112-129.
- Hernández, J., & Torres, F. (2022). Aplicaciones de sensores ultrasónicos en monitoreo de tanques industriales: estudio de campo. *Instrumentación y Control*, 32(4), 215-232.
- Hernández, M., Torres, P., & Velasco, R. (2022). Análisis estructural de tanques cilíndricos para almacenamiento de combustibles. *Ingeniería Mecánica*, 19(2), 145-163.
- Hernández, S. (2021). Interpretación y aplicación práctica de NFPA 30 en instalaciones industriales. *Prevención de Riesgos*, 17(3), 87-104.
- ISO (International Organization for Standardization). (2021). *ISO 9001:2015 Quality Management Systems Requirements*. Geneva: ISO.
- López, F., & García, T. (2024). Tecnologías emergentes para detección temprana de fugas en sistemas de almacenamiento. *Protección Ambiental*, 28(1), 45-62.
- López, J., & Gómez, R. (2023). Configuraciones óptimas para tanques elevados en entornos industriales. *Ingeniería y Construcción*, 42(2), 156-172.
- López, M., & Fernández, T. (2022). Integración de sistemas de monitoreo con plataformas SCADA modernos. *Automatización Industrial*, 37(3), 112-128.
- López, M., & Ramírez, S. (2022). Sistemas de puesta a tierra para instalaciones con combustibles inflamables. *Seguridad Eléctrica*, 28(4), 78-94.

- López, M., Torres, N., & Vázquez, R. (2023). Aplicaciones del polietileno de alta densidad en almacenamiento de hidrocarburos. *Materiales Industriales*, 15(3), 134-151.
- López, S., & Torres, J. (2022). Optimización de inventarios de combustible en entornos industriales. *Logística y Operaciones*, 31(2), 67-83.
- Martínez, A., & Gómez, J. (2022). Conduits y protecciones para cableado en ambientes con combustibles. *Instalaciones Eléctricas*, 24(3), 118-134.
- Martínez, F. (2021). Tecnologías avanzadas para medición de nivel en aplicaciones industriales. *Automatización y Control*, 27(3), 45-62.
- Martínez, J., & Pérez, R. (2021). Protección anticorrosiva para tanques subterráneos de combustible. *Corrosión y Protección*, 16(2), 87-103.
- Martínez, J., Rodríguez, F., & Sánchez, T. (2022). Componentes críticos en sistemas de monitoreo para aplicaciones de alta disponibilidad. *Ingeniería de Sistemas*, 19(4), 145-162.
- Martínez, L., Pérez, R., & Gómez, N. (2023). Diseño óptimo de sensores ultrasónicos para aplicaciones industriales. *Instrumentación y Medida*, 34(2), 67-85.
- Martínez, M., & Rodríguez, P. (2022). Normativas internacionales para almacenamiento seguro de combustibles industriales. *Seguridad Industrial*, 19(3), 134-151.
- Mendoza, J., & Pérez, A. (2022). Balizas y sistemas de señalización industrial: eficacia y normativas. *Seguridad y Señalización*, 25(2), 78-95.
- Morales, E., & Fernández, T. (2023). Principios fundamentales de la tecnología ultrasónica en medición industrial. *Instrumentación y Control*, 41(3), 112-129.
- Morales, F., González, J., & Pérez, A. (2023). Implementación de sistemas de monitoreo de nivel en la industria textil colombiana. *Tecnología Textil*, 25(2), 87-103.
- Morales, J., & Torres, P. (2024). Comparación crítica de tecnologías de medición de nivel para la industria 4.0. *Automatización Avanzada*, 26(1), 34-51.
- NFPA (National Fire Protection Association). (2021). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Quincy, MA: NFPA.
- Pérez, J., & Gómez, R. (2022). Configuración y calibración de sensores ultrasónicos en entornos industriales. *Instrumentación Industrial*, 36(4), 123-140.

- Pérez, T., & Ramírez, F. (2020). Impacto ambiental de sistemas de almacenamiento de combustibles: estrategias de mitigación. *Gestión Ambiental*, 22(3), 134-151.
- Ramírez, A. (2021). Diseño centrado en usuario para pantallas industriales HMI. *Interfaces Industriales*, 18(2), 67-84.
- Ramírez, A. (2023). Protocolos de emergencia para instalaciones con combustibles inflamables. *Prevención y Control*, 27(3), 112-129.
- Ramírez, J., & Ordoñez, L. (2023). Análisis comparativo de tecnologías de medición industrial: eficiencia y costos. *Instrumentación Avanzada*, 35(1), 57-73.
- Rodríguez, A., & Martínez, J. (2023). Tendencias en automatización industrial: el rol de los sensores inteligentes. *Automatización y Control*, 32(1), 34-51.
- Rodríguez, A., & Pérez, J. (2022). Configuración óptima de sensores ultrasónicos para mediciones en combustibles. *Instrumentación y Control*, 41(2), 78-94.
- Rodríguez, F., López, M., & Sánchez, J. (2020). Clasificación y criterios de selección para tanques superficiales de combustible. *Ingeniería Química*, 51(2), 134-150.
- Rodríguez, J., & Méndez, T. (2020). Análisis de inconsistencias en medición manual de niveles en tanques industriales. *Metrología Industrial*, 18(3), 112-128.
- Rodríguez, M., González, P., & Fernández, J. (2021). Conductividad y capacitancia en sensores de nivel: principios de medición. *Sensores y Transductores*, 28(3), 145-162.
- Silva, F., & Rodríguez, J. (2021). Protocolos de prueba para validación de sistemas instrumentados de monitoreo. *Metrología y Calidad*, 22(4), 127-143.
- Silva, J. (2022). ISO 9001 en la industria de combustibles: implementación eficaz. *Sistemas de Gestión*, 15(1), 45-62.
- Torres, A. (2021). Distancias de seguridad en instalaciones de almacenamiento de combustibles. *Protección contra Incendios*, 24(3), 97-114.
- Torres, F. (2022). Integración de sistemas SCADA en gestión energética industrial. *Automatización y Control*, 28(4), 123-139.
- Vázquez, J., & Hernández, R. (2021). Compensación térmica en sensores industriales: principios y aplicaciones. *Instrumentación Industrial*, 33(3), 112-129.
- Vázquez, M., & Jiménez, F. (2022). Metodologías avanzadas de selección de instrumentación industrial. *Automatización y Control*, 30(2), 87-104.

Vega, R., & Castillo, S. (2021). Avances en tecnología de sensores ultrasónicos para aplicaciones industriales. *Instrumentación Industrial*, 32(4), 145-162.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS
MANUAL DE MODULO ANALOGICO



LX3V-2ADI2DAI-BD

User manual



Website: <http://www.we-con.com.cn/en>
Technical Support: support@we-con.com.cn
Skype: fcwkkj
Phone: 86-591-87868869
QQ: 1043098682
Technical forum: <http://wecon.freeforums.net/>



1. Installation Instructions

Before installation, it is necessary to ensure that the associated equipment of the PLC host and the terminal of the BD module are reliably powered off.

This module comes with two standard terminals; please plug the terminals into the module terminals after wiring. Confirm the installation of host, module and wiring are correct and then power on.

Caution:

- 1) When using current output, make sure that the external load resistance is $\leq 500\Omega$. If the external load resistance $> 500\Omega$, the output current will be lower than normal;
- 2) The input must not exceed the absolute maximum (-2mA/30mA) or cause the module to be damaged;
- 3) The fastening torque is 0.3-0.6N.m. Firmly screw down to prevent malfunctions;
- 4) The PLC main unit of the LX3V can only use one BD module. Don't try to use two or more BD modules (these BD modules will not work);
- 5) When mounting module to PLC, all the lights are blinking after powering ON PLC, which means this PLC can't support it, please purchase new PLC.

Warnings:

Cut off the electricity before installation/disassembly of the unit or connection of wires onto the unit, to prevent electric shock or product damage.

2. Features of LX3V-2ADI2DAI-BD

- 1) It could use LX3V-2ADI2DAI-BD to add 2 analog input points and 2 analog output points. It is internally installed in the top of PLC, thus it is not necessary to change the PLC's installation area.
- 2) The digital analog conversion of the LX3V-2ADI2DAI-BD module is the voltage inputs (4~20mA), and the data of all the channels after conversion are stored inside a special digital memory, but the converted characteristics of the analog data cannot be adjusted. The allocation of the relevant channel addresses is in the following table.

Table 2-1

Address	Instructions	Address	Instruction
M8112	CH1: flag of the input mode OFF: Current input mode	D8112	Digital value of CH1
M8113	CH2: flag of the input mode OFF: Current input mode	D8113	Digital value of CH2
M8114	CH3: Flag of the output mode OFF: Current output mode	D8114	Digital value of CH3
M8115	CH4: flag of the output mode OFF: Current output mode	D8115	Digital value of CH4

3. Dimension



Figure 3- 1

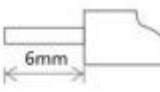
Table 3-1

IN-2ADI Part Input current ranges: 4~20mA		OUT-2DAI Part Output current ranges: 4~20mA	
li 1+	The anode of CH1 current input	lo 1+	The anode of the CH1 current output
li 1-	The cathode of CH1 current input	lo 1-	The cathode of the CH1 current output
*	Disconnect	*	Disconnect
li 2+	The anode of CH2 current input	lo 2+	The anode of the CH2 current output
li 2-	The cathode of CH2 current input	lo 2-	The cathode of the CH2 current output

LED lights indicating:

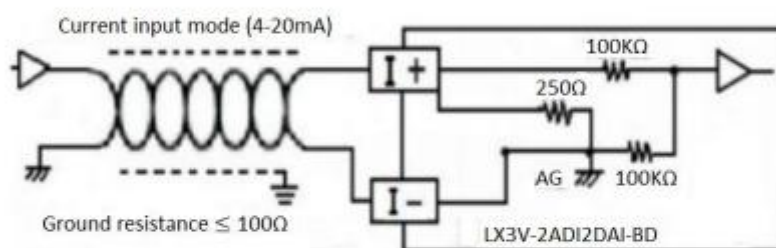
- POW LED: Constantly ON when PLC power ON;
- COM LED: Lit when communicating PLC, OFF when timeout;
- CH1 LED: LED for CH1, constantly ON when analog signal in range, lit when analog signal out of range (4~20mA). OFF when M8112 turns ON.
- CH2 LED: LED for CH2, constantly ON when analog signal in range, lit when analog signal out of range (4~20mA). OFF when M8113 turns ON.
- CH3 LED: LED for CH3, constantly ON when M8114 turns OFF, OFF when M8114 turns ON.
- CH4 LED: LED for CH4, constantly ON when M8115 turns OFF. OFF when M8115 turns ON.

Table 5-1

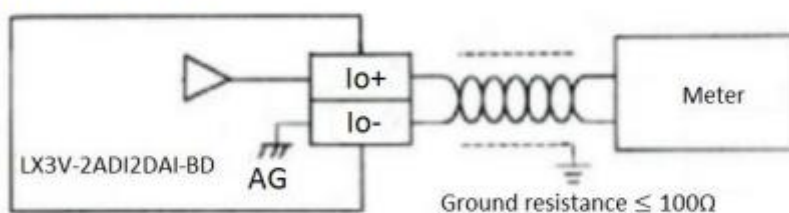
Line type	Cross sectional area(mm ²)	End-of-pipe treatment	
AWG26	0.1288	Stranded cable: stripped jacket, rub Conductor, then connect the cable.	
AWG16	1.309	Single-core cable: stripped jacket, Then connect the cable.	

5.2 Input and Output mode

1) Current Input Mode

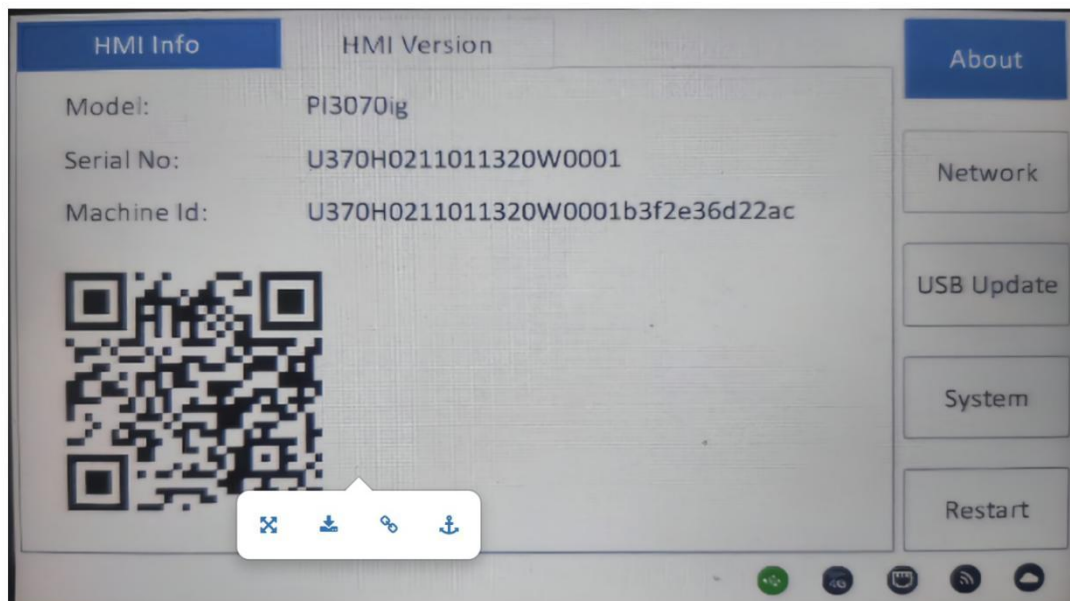


2) Current Output Mode



6. Example

The analog value (4~20mA) in each channel will be saved in system address (D8112, D8113). It will



Model	V-Net Functions								MQTT	Lua Script	LAN Monitoring	4G / WiFi
	Realtime Data	Alarm Data	History Data	APP & Remote Control	Remote Update HMI	WVFN	Cloud SCADA	Pass-through				
PI3070g	X	X	X	✓	✓	✓	X	Serial	✓	✓	✓	X
PI3070g (G)	X	X	X	✓	✓	✓	X	Serial	✓	✓	✓	4G
PI3070g (AG)	X	X	X	✓	✓	✓	X	Serial	✓	✓	✓	4G(global)
PI3070g (W)	X	X	X	✓	✓	✓	X	Serial	✓	✓	✓	WiFi
PI3070g-C	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	X
PI3070g-C(G)	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	4G
PI3070g-C(AG)	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	4G(global)
PI3070g-C(W)	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	WiFi
PI3070g-CH(W)*	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	WiFi
PI3070g-CH(G)*	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	4G
PI3070g-CH(AG)*	100	20	50	✓	✓	✓	✓	Serial	✓	✓	✓	4G(global)
PI3070g-O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	✓	✓	X

Notes: * The resolution is 1024*600

SPECIFICATIONS

Main Display	Processor	High Performance CPU
	Size	7"
	Screen	TFT
	Resolution	800*480
	Brightness (cd/m2)	250
	Backlight	LED
	Backlight Lifetime	50,000 hours
Storage	Touch Panel	High precision four-wire resistive
	Memory	128 MB
	Flash	128 MB
	SD Card Slot	YES
	USB Port	USB2.0 Host + USB2.0 Client (Could not use at the same time)
RTC	Real-time clock	Yes
	Calendar	Yes
IO Port	COM1	CN1:RS422/RS485 CN2:RS232 CN3:RS485
	COM2	-
	COM3	-
	Ethernet	x1
	CANopen	-
Power	Rated Power	< 8W
	Power Voltage	DC 24V
	Input range	DC 12 ~ 28V
	Shell Color	Grey
Enclosure	Shell Material	Plastic+ABS(Polycarbonate)
	Overall Size (mm)	201.2W*147.2H*39.0D
	Mounting Size (mm)	192.0W*138.0H
	Mounting Method	Panel Mount
Environment	Weight (Kg)	0.52
	Working Temperature	-10 ~ 55°C
	Storage Temperature	-20 ~ 70°C
	Humidity	10 ~ 90% RH (Non-condensing)
	Vibration Resistance	10 ~ 25 Hz (X, Y, Z direction 2G/00 minutes)
Software	Cooling	Air Cooling
	Programming	PI Studio
	Remote Access	YES
	Email Alarm	YES
	IP Camera	-
	Audio Output	-
	Video Player	-
Certificates	Data Tool	Yes
	IP Code	P65 (Front panel)
	CE	CE Marked
	FCC	FCC Class A



MANUAL DEL SENSOR ULTRASONICO



Product Introduction

ema Ultrasonic Level Transmitter features with durable and stable operation, simple structure, easy installation

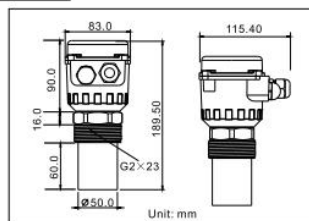
Applications:

Electrical industry, Metallurgical industry, Petroleum and Chemical industry, Food industry, Water treatment, Papermaking, especially suitable for the level measurement of aggressive liquids.

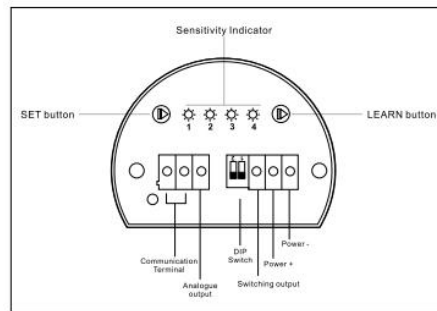
Benefits:

- It is capable of measuring the level of liquid and solid
- High accuracy, low power consumption, and wide measuring range
- Non-contact measurement without any mechanical component. It is ideal applications for solvent, hydrocarbon and petroleum
- Thanks to build-in calibration for speed and frequency, the measurement is more reliable
- Analogue and switching output

Dimensions



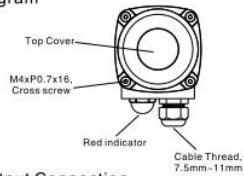
Panel control and display



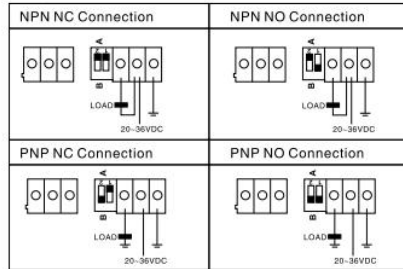
1. The function of DIP Switch
number 1 DIP Switch :NO/NC switching output,
A means NC output to NC;
number 2 DIP Switch :PNP/NPN switching output,
A means NPN output.
2. Buttons Functions
SET: Menu selection;
LEARN: Parameters learning.
3. Indicators
The lamp lights on when there is a switching signals,
otherwise the light is off.
4. Communication Terminal
It is used for upgrade version, not for this product.

Connection

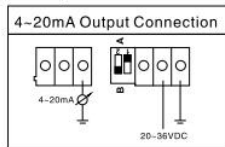
Wiring Diagram



NO/NC Output Connection



Analogue Output Connection



Notice:

number 1 DIP Switch :
NO/NC switchable,
A means NC output

number 2 DIP Switch :
PNP/NPN switchable,
A means NPN output

Functions Indication

	Normal working status, lamp 1 flashes
	When the level is higher than Max. point, lamp 2 lights on
	When the level is lower than Min. point, lamp 3 lights on
	Connecting with control box, lamp 4 lights on

This Ultrasonic Level Switch does not support 485 protocols.

• In operating mode:
press "LEARN" button to examine the adjustment of analogue output.

		Press "LEARN" button, it start to measure the altitude level and lamp 2.3.4 light on. (ASP is on the upper Point and AEP is on the lower Point.)
		Press "LEARN" button, it start to measure the depth level and, and Lamp 2.3.4 light on. (Now AEP is on the upper Point and ASP is on the lower Point.)

• Unlock Indication:

		Press the two buttons at once for 5 seconds. The unit is unlock when Lamp 1 and 4 flash.
--	--	--

5

6

Functions and parameters adjustment

under unlock status

1. Set the SP Point

		Press "SET" button, lamp 1 flashes
		Press "LEARN" button, it starts to learn the current parameters and four lamps flash on in turn
		When the setting is confirmed, lamp 2 and 3 flash
		When the setting is in error, lamp 2 and 3 flashing alternately

2. Set the RP Point

		Press "SET" button, lamp 2 flashes. The following steps are the same as setting the SP
--	--	--

3. Set the Analogue Start Point (ASP)

		Press "SET" button, lamp 3 flashes. The following steps are the same as setting the SP
--	--	--

4. Set the Analogue End Point (AEP)

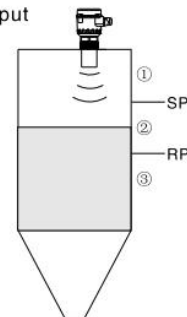
		Press "SET" button, lamp 4 flashes. The following steps are the same as setting the SP
--	--	--

Notice: The frequency of lamp 1 flashes in normal working is different from the flashing frequency of adjusting the parameters.

7

Function

1. Switching Output



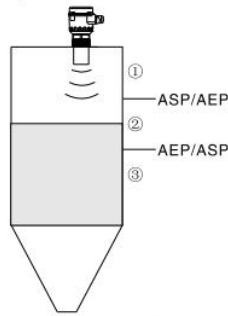
	Normal Open (NO)	Normal Close (NC)
① Position 1—higher than SP	Yes	No
② Position 2—between SP and RP	Delay	Delay
③ Position 3—below RP	No	Yes

Notice:

- (1) The position of SP must be higher than RP. If the value of SP is lower than RP, the system will automatically adjust the value of RP 1 cm lower than that of SP.
- (2) When the value of SP or RP is out of the measuring range, the learning function would be failed.
- (3) The product features with overload protection. When the output current (PNP or NPN) is over 400mA, it will automatically switch off as a protection. After getting rid of overload, the protection can be removed.

8

2. Analogue Output



		Adjustment
① Position 1	4mA	ASP on the upper point, AEP on the lower point
	20mA	AEP on the upper point, ASP on the lower point
② Position 2	4~20mA is equally allocated from top to down.	ASP on the upper point, AEP on the lower point
	4~20mA is equally allocated from top to down.	AEP on the upper point, ASP on the lower point
③ Position 3	20mA	ASP on the upper point, AEP on the lower point
	4mA	AEP on the upper point, ASP on the lower point

Notice:

- (1) To ensure the accuracy, the values of ASP and AEP must keep in a proper distance.
- (2) It indicates "Error" While the value of ASP and AEP are out of the detecting range.
- (3) The value of ASP can be lower than AEP or higher than AEP.

9

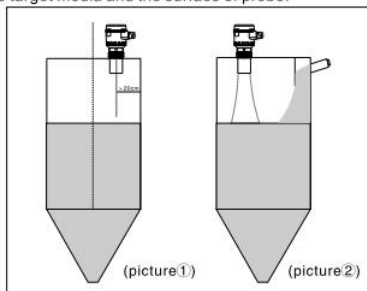
Technical Parameters

Measuring range (M)	0.3...8
Inactive area(M)	≤0.3
Accuracy (%)	± 0.1
Response time (s)	1.5
Reversed polarity protection	Yes
Input Voltage (V)	20...36
Current consumption (mA)	< 50
Output	Output 1: NPN or PNP Output 2: 4~20 mA
Watchdog	Yes
Temperature Compensation	Yes
Gain Calibration	Yes
Overload protection	Yes
Max. load of Switching output (mA)	400
Voltage Drop [V]	< 3.5
Operating temperature [°C/°F]	-40...80/-40...176
Min. resolution (mm)	1
Housing material	PA66, ABS, Aluminum Alloy
Protection classification	IP65

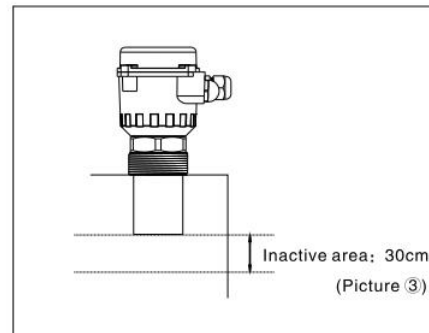
10

Installation Notice

1. Please install the ultrasonic level transmitter at position which is at least 20cm to the vessel wall. Do not install the device in the centerline of tank in order not to receive the false echoes. (see picture ①)
2. Please mount the bottom line of probe being parallel to non-flowing medium. Do not mount the bottom of the device toward filling inlet. It is recommended to install a protective shield if necessary. (see picture ②)
3. Excessively low or high pressure (vacuum) may reduce the echoes. Please use it within the normal pressure range. Foam or too much dust could cause the false echoes which may influence the measuring result. Under such condition, please choose other level products instead. Ultrasonic level switch is not suitable for the use under extreme temperature.
4. The inactive area is the minimum measured distance between the transmitter surface and the medium. When carry out the measurement in the inactive area, it may cause inaccuracy performance. The distance should be greater than inactive area (see picture ③) and the measuring value is the distance between the target media and the surface of probe.



11



Usage and Storage Notice

1. Please protect the probe against heavy shocking.
2. Please clean the attached materials on the transmitter surface regularly and also keep the surface clean and smooth.

Electrical Connection



The unit must be connected by a technical electrician. The national and international regulations for the installation of electrical equipment must be adhered to.
Voltage supply to EN50178, SELV, PELV
Disconnect the power before connecting the unit

12

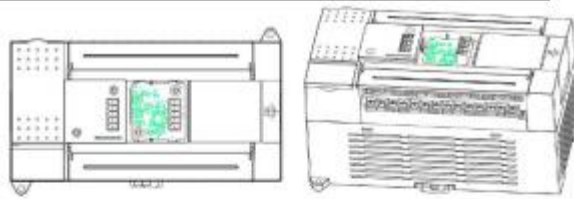


Figure 1-5

1.4 Dimension

1) PLC CPU

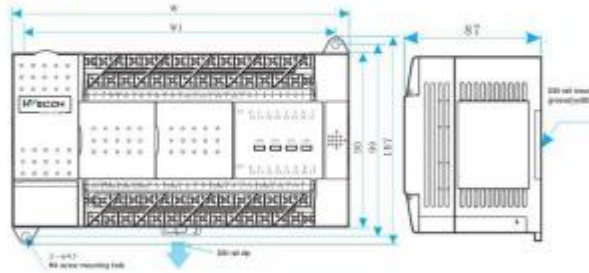


Figure 1-6

Mount the plc in the DIN (35mm) rail directly. Gently pull out the DIN rail mounting clip from below, then we could remove the main unit from DIN rail. The mounting holes could be used to directly mount the programmable controller with M4 screws. Please refer to the following table for the pitch and location of mounting holes.

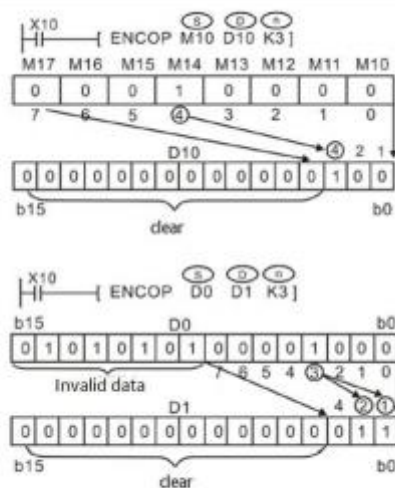
Table 1-1

MODEL	W(mm)	W1(mm)	MODEL	W(mm)	W1(mm)
LX3V-0805MX	75	61	LX3V-1208MX	75	61
LX3V-1212MX	136	123	LX3V-1412MX	136	123
LX3V-1616MX	175	161	LX3V-2416MX	175	161
LX3V-2424MX	221	207	LX3V-3624MX	221	207

6

WECON technology Co., Ltd.

H





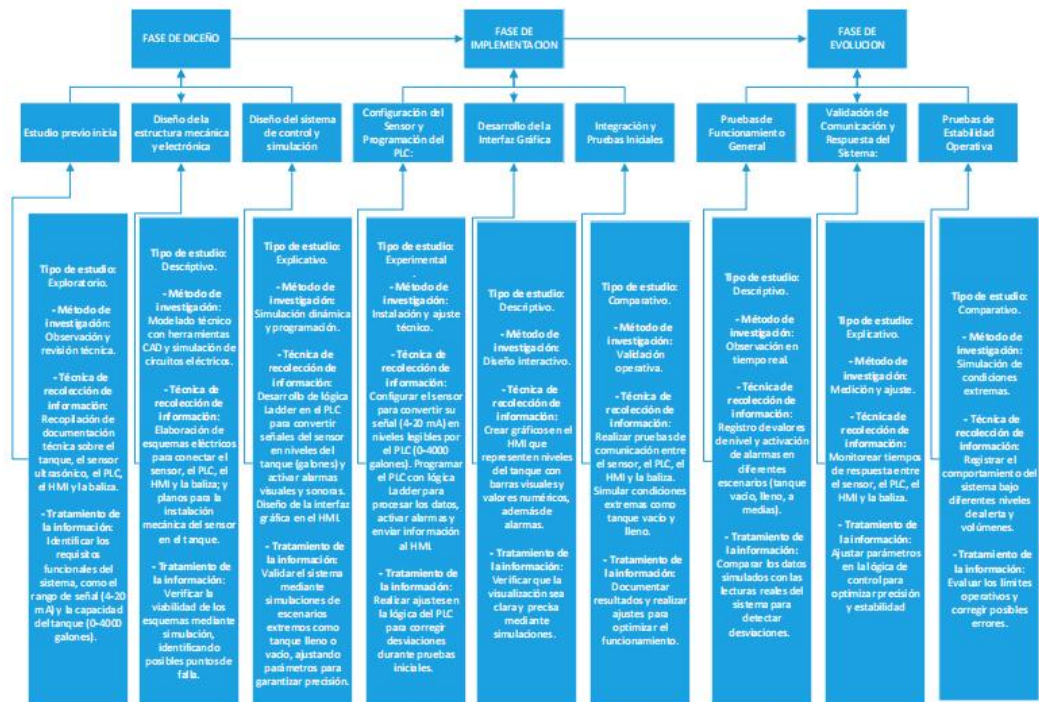
Software de Programación de PLC's

Fotografías de la implementación

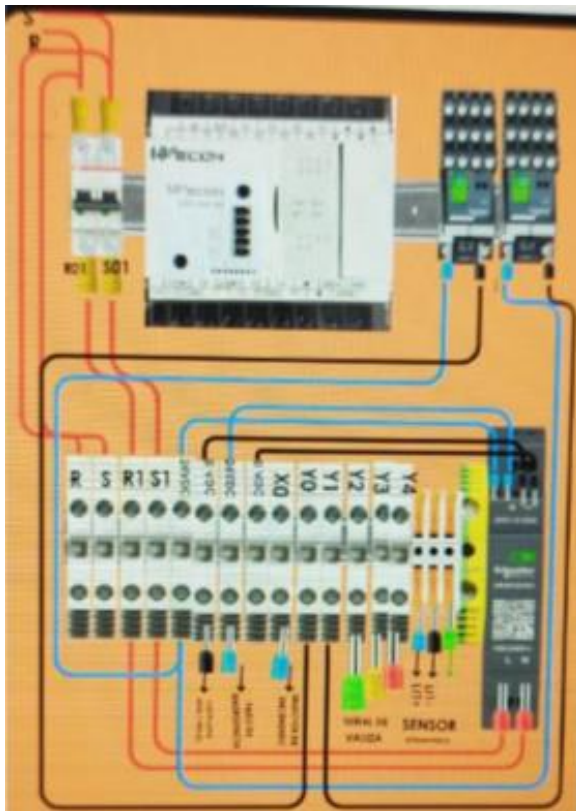
La medición manual imprecisa del nivel de diésel en el tanque de 4000 galones genera problemas operativos que afectan la eficiencia industrial. Entre las principales causas se identifican el uso de métodos manuales, la falta de monitoreo en tiempo real y la ausencia de un sistema automatizado, lo que conlleva errores humanos, baja frecuencia de verificación y ausencia de alertas críticas. Estos factores provocan interrupciones en la producción, pérdidas económicas y riesgos para la maquinaria, afectando la continuidad del proceso de tinturado. Como consecuencia, se generan retrasos en la producción, aumento en los costos operativos y reducción de la vida útil de los equipos. Para mitigar estos efectos, es fundamental implementar un sistema de medición automatizado, garantizando mayor precisión, seguridad y optimización del consumo de combustible.



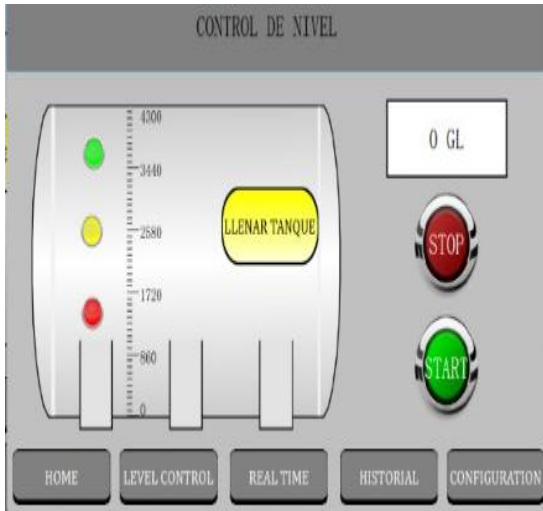
FASES Y ETAPAS

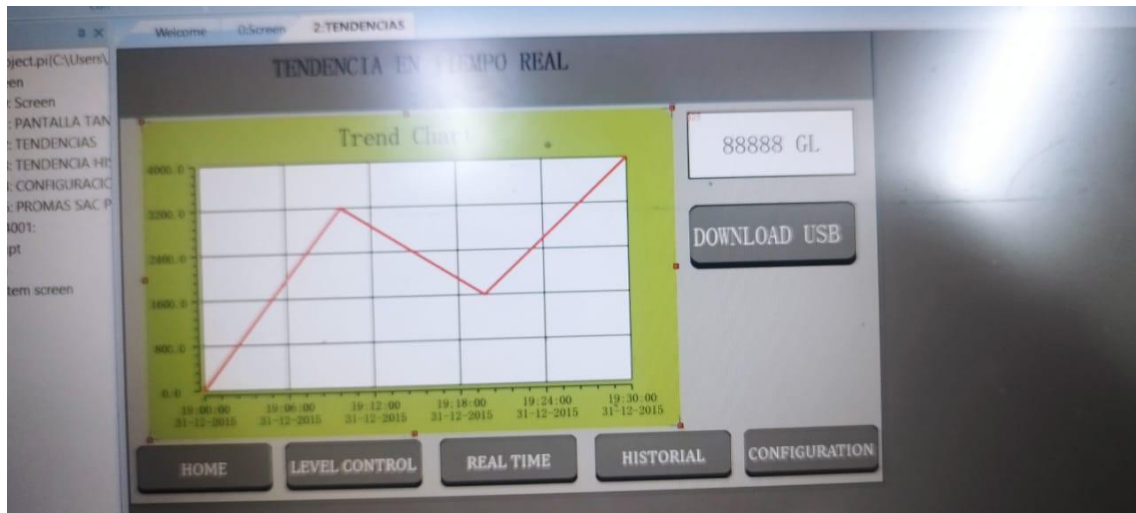


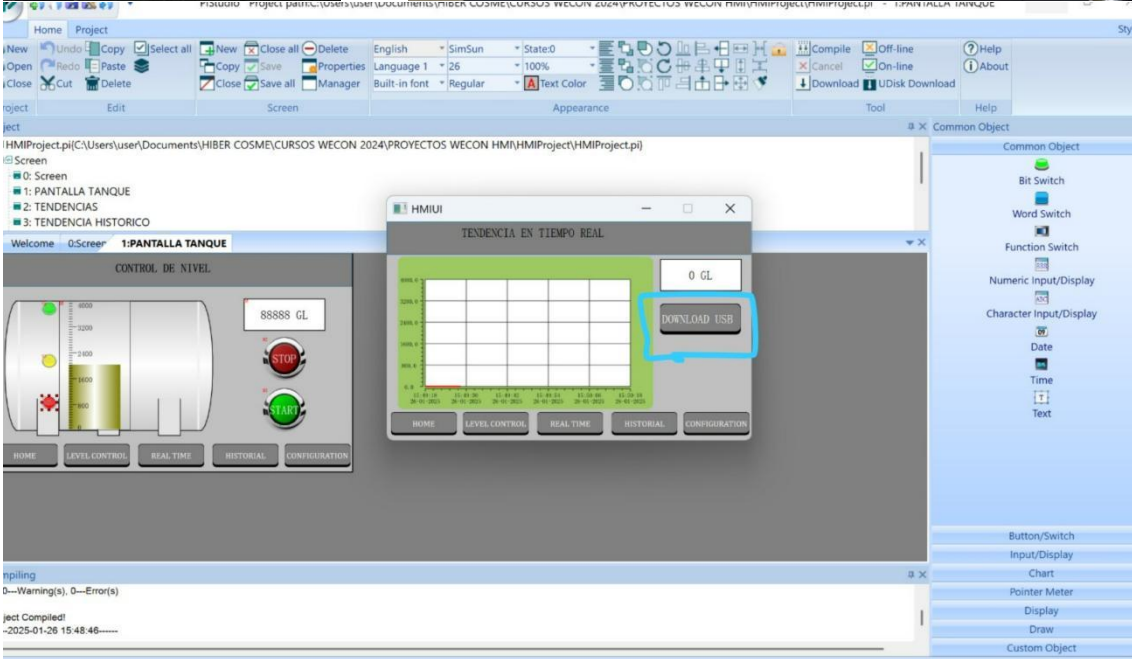
PROTOTIPO DE CIRCUITO REALIZADO EN CAMVA

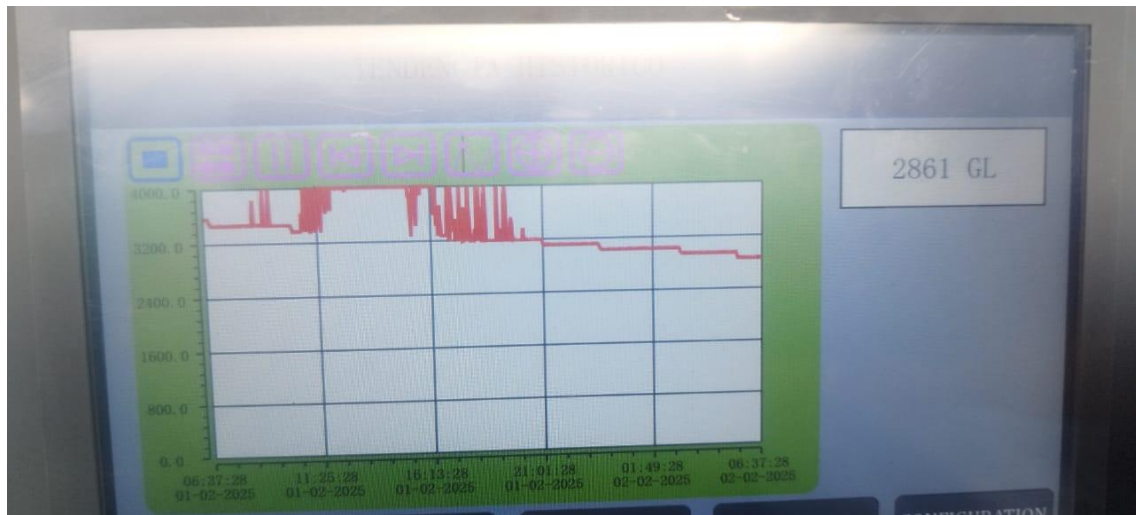


La interfaz de control de nivel presentada en la imagen corresponde a un sistema automatizado de monitoreo de diésel, diseñado para optimizar la gestión del combustible en tanques de almacenamiento. Mediante una representación gráfica, se visualiza el estado del tanque con indicadores de nivel y alertas luminosas, permitiendo una supervisión en tiempo real. La funcionalidad del sistema incluye opciones como historial de datos, configuración y control en tiempo real, facilitando la toma de decisiones operativas. Adicionalmente, los botones de "START" y "STOP" permiten gestionar el llenado del tanque, garantizando un suministro eficiente. Este sistema mejora la precisión de la medición, reduciendo los errores asociados a métodos manuales y optimizando la eficiencia operativa en entornos industriales.

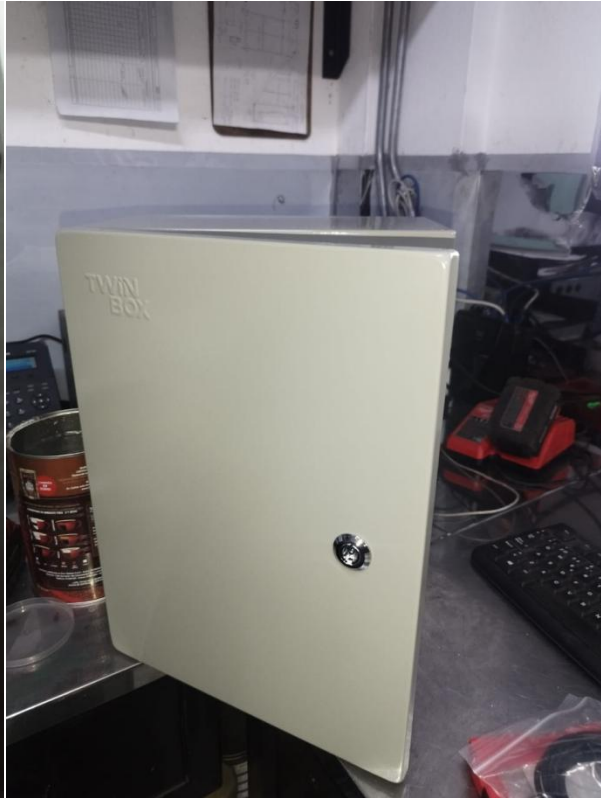


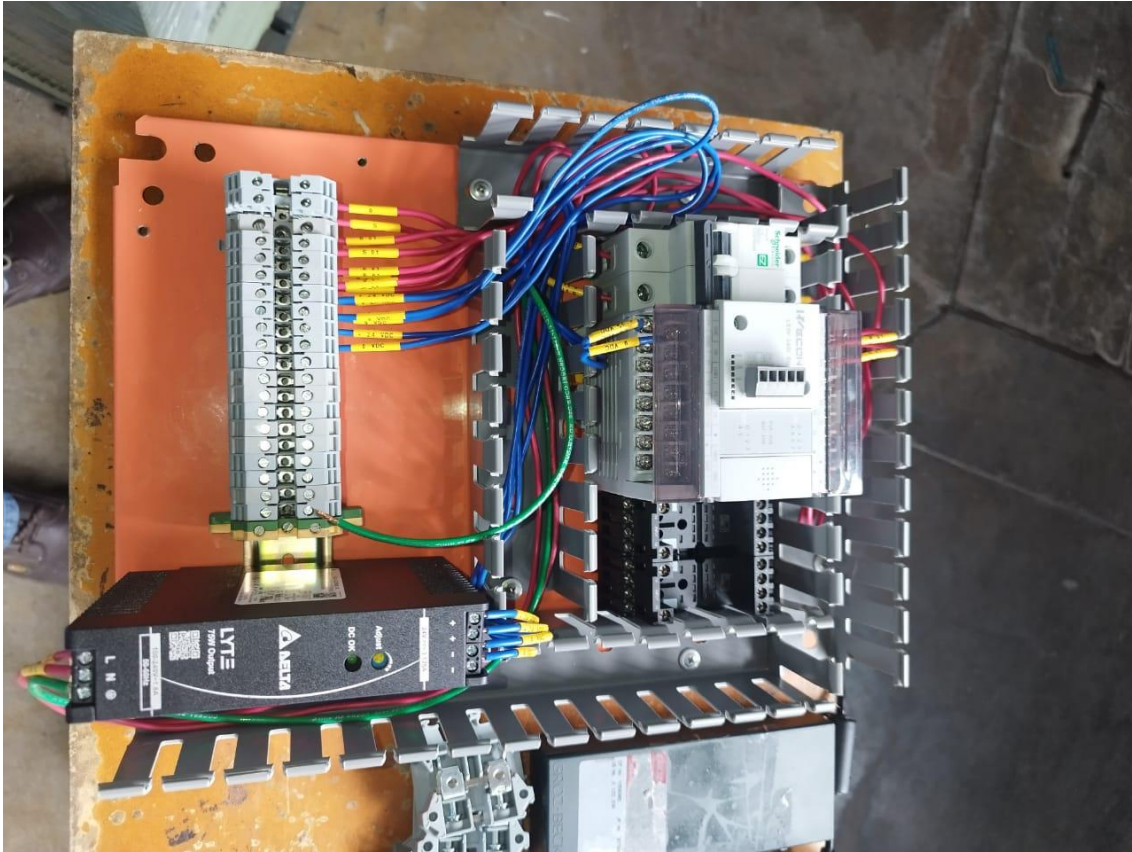












Tablas comparativas

Tablas Comparativas para Sistema de Medición de Nivel

Tabla 1: Comparación entre Tecnologías de Medición de Nivel para Tanques de Diésel

Tecnología	Precisión	Ventajas	Desventajas	Costo Relativo	Aplicaciones Ideales
Medición Manual (Varilla)	$\pm 0.85\%$	• Simple y económica • No requiere energía • Fácil de implementar	• Requiere intervención humana • Baja frecuencia de medición • Riesgo de error humano • Exposición a vapores	Bajo	• Tanques pequeños • Operaciones de baja criticidad • Sistemas de respaldo
Flotador Mecánico	$\pm 1.0-2.0\%$	• Visualización directa • Independiente de propiedades eléctricas • Relativamente económico	• Partes móviles sujetas a desgaste • Afectado por turbulencia y espuma • Requiere mantenimiento	Medio-Bajo	• Tanques de almacenamiento estático • Cuando se requiere visualización local

Tecnología	Precisión	Ventajas	Desventajas	Costo Relativo	Aplicaciones Ideales
			regular		
Sensor Hidrostático	±0.5-1.0%	• Buena precisión • Sin partes móviles • Amplio rango de medición	• Afectado por cambios de densidad • Requiere calibración para cada fluido • Potencial obstrucción de diafragma	Medio	• Tanques abiertos o ventilados • Líquidos de densidad constante
Sensor Ultrasónico	±0.25-1.0%	• Sin contacto con el líquido • Bajo mantenimiento • No afectado por propiedades del líquido	• Afectado por espuma y vapor • Requiere instalación correcta • Sensible a temperatura ambiente	Medio-Alto	• Tanques de productos corrosivos • Donde se requiere medición sin contacto • Aplicaciones industriales generales
Radar (espacio libre)	±0.1-0.5%	• Alta precisión • No afectado por vapor o presión • Funciona en condiciones extremas	• Costo elevado • Instalación más compleja • Requiere configuración especializada	Alto	• Tanques con condiciones variables • Aplicaciones de alta precisión • Entornos industriales exigentes
Radar Guiado (TDR)	±0.03-0.1%	• Máxima precisión • Excelente en presencia de espuma • Ideal para interfaces líquido-líquido	• El más costoso • Invasivo (requiere contacto) • Instalación más compleja	Muy Alto	• Medición de interfaces • Aplicaciones críticas • Fluidos difíciles (espumosos/turbulentos)

Fuente: Elaboración propia basada en análisis comparativo de tecnologías disponibles en el mercado (2024)

Tabla 2: Comparación de Rendimiento entre Sistema Manual y Sistema Automatizado Implementado

Parámetro de Evaluación	Sistema Manual (Método Anterior)	Sistema Automatizado (Nuevo)	Mejora Porcentual	Impacto Operativo
Precisión	±28 mm (±0.85%)	±7 mm (±0.15%)	82%	Reducción de incertidumbre en inventario y planificación
Frecuencia de medición	3 veces por turno (9/día)	Continua (cada 15 minutos)	96%	Visibilidad constante del nivel de combustible
Tiempo requerido por medición	15-23 minutos	< 3 segundos	>98%	Liberación de personal para tareas de mayor valor
Detección de niveles críticos	Detección tardía (92 min promedio)	Detección inmediata (18 min)	80%	Prevención efectiva de desabastecimiento
Horas-hombre mensuales	Aproximadamente 45 horas	5 horas (configuración y supervisión)	89%	Reducción significativa de costos operativos
Paradas no programadas	3 en 6 meses	0 en período equivalente	100%	Eliminación de pérdidas por interrupción de producción
Exposición a riesgos	600 horas-hombre/año	Prácticamente nula	>99%	Mejora en seguridad ocupacional
Precisión en cálculo de volumen	Error hasta 10% en volumen	Error máximo 0.5% en volumen	95%	Mayor confiabilidad en gestión de inventario
Optimización de inventario	Nivel mínimo operativo: 25%	Nivel mínimo operativo: 18%	28%	Liberación de capital inmovilizado
Costo logístico	\$0.082/galón	\$0.063/galón	23%	Optimización de cadena de suministro

Fuente: Datos recopilados durante el período de pruebas comparativas (2024)

DIAGRAMA DE PROGRAMACION EN EL SOFTWARE WECON PLC ESTUDIO

