

PROTOTIPO DE SISTEMA DE MONITOREO DE ALMACENAMIENTO Y FLUJO DE AGUA EN UNA PURIFICADORA DEL IPN”

T R A B A J O T E R M I N A L 2 0 2 4 -

Presentan:
Sanchez Campos Mauro Noel

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Cómputo



Resumen

Se desarrolló un prototipo de sistema de monitoreo para una planta purificadora de agua perteneciente al Instituto Politécnico Nacional (IPN), específicamente para la Dirección de Incubación de Empresas Tecnológicas (DIET). Esta planta juega un papel crucial en el suministro de agua potable a diversas unidades del IPN, lo que implica una operación continua que requiere supervisión constante para garantizar la calidad del recurso hídrico y la eficiencia de los procesos.

El proyecto se compone de dos módulos principales: el **módulo de hardware** y el **módulo de software**, diseñados para trabajar de manera conjunta y complementaria. El módulo de hardware integra los componentes necesarios para la recopilación de datos mediante sensores estratégicamente instalados en la planta. Estos sensores monitorean parámetros clave, como niveles de agua y flujo, asegurando una recopilación precisa y confiable de información en tiempo real. Entre los dispositivos utilizados destacan una tarjeta de datos basada en un microcontrolador ESP32, un sensor ultrasónico para nivel (HCSR04) y un sensor de flujo (aunque su integración completa dependerá de futuras actualizaciones para cumplir con normativas sanitarias).

Por su parte, el **módulo de software** se enfoca en la interpretación y visualización de los datos recopilados. Mediante tecnologías como Blazor y bases de datos MySQL, el sistema proporciona una interfaz gráfica amigable y personalizada que permite a los usuarios monitorear y analizar las métricas del recurso hídrico en la planta. Este módulo transforma los datos brutos en información relevante y procesable, facilitando la toma de decisiones informadas y oportunas.

El trabajo conjunto de estos módulos ofrece un sistema eficiente para el monitoreo continuo, asegurando que el personal encargado de la planta tenga acceso a información crítica sobre la operación y el estado del sistema. Este prototipo no solo responde a las necesidades inmediatas de supervisión en la planta de la DIET, sino que también sienta las bases para futuras mejoras e implementaciones que permitan optimizar aún más los procesos operativos y garantizar la sostenibilidad del suministro de agua potable en el IPN.

Índice

Resumen	2
Índice	3
Glosario	5
1. Introducción	6
1.1 Objetivos	6
1.1.1 Objetivo General:	6
1.1.2 Objetivos Específicos:	6
1.2 Justificación	7
1.3 Monitoreo para eficiencia	8
2. Marco Teórico	8
2.1 Planta Purificadora	8
2.1.1 Proceso de purificación	9
2.1.2 Planta Purificadora de la DIET	10
2.1.3 Monitoreo en la Planta	11
2.1.4 Variables de Interés	11
2.2 Sistemas de Monitoreo	12
2.3 Tarjeta de adquisición de datos	14
2.4 Interfaz grafica de usuario	16
2.5 Medición de Nivel	19
2.6 Medición de Flujo	22
2.7 Normativas y Estándares	25
2.7.1 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	25
2.7.2 Estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO)	25
2.7.3 Lineamientos de la American Water Works Association (AWWA)	26
3. Modulo de Hardware	27
3.1 Análisis	27
Selección del Microcontrolador ESP32	27
Uso de Arduino como SDK	27
Análisis del Sensor de Flujo YFS201	28
Análisis del Sensor de Nivel HCSR04	28
Geometría del Tanque	28
Variables Monitoreadas	29
3.2 Métodos y Materiales	29
3.3 Diseño	30
3.4 Implementación del modulo de Hardware	30
4. Modulo de Software	31
4.1 Análisis	31
4.2 Métodos y Materiales	31
4.3 Diseño	32
4.4 Implementación del Módulo de Software	32
5. Pruebas	33

Índice para llenar apartado de pruebas	33
Elementos posibles para maqueta	36
Diseño del Recipiente	36
Sensor de Nivel	36
Sensor de Flujo	37
Integración del Sistema	37
Simulación de Consumo de Agua	37
Prototipo de maqueta	37
Instrumentación de Sensores	38
6. Resultados y Discusión	39
6.2 Discusión	40
7. Trabajo a Futuro	41
8. Conclusiones	42
Referencias	43

Glosario

Agua Cruda: Agua que no ha sido sometida a ningún tratamiento de purificación y que generalmente contiene contaminantes físicos, químicos y microbiológicos.

Agua Potable: Agua que cumple con las especificaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, apta para el consumo humano.

Bomba Hidráulica: Dispositivo utilizado para mover agua desde un punto a otro en un sistema de tratamiento o distribución, como la bomba AQUA PAK FIX10E utilizada en este proyecto.

Desinfección: Proceso químico o físico utilizado para eliminar microorganismos patógenos presentes en el agua, comúnmente mediante el uso de cloro, ozono o luz ultravioleta.

Filtración: Etapa del tratamiento de agua que consiste en hacer pasar el líquido a través de un material poroso (como arena o carbón activado) para eliminar partículas sólidas, olores y sabores no deseados.

Floculación: Proceso químico mediante el cual las partículas pequeñas en el agua se agrupan en flóculos más grandes, facilitando su sedimentación o eliminación.

Luz Ultravioleta (UV): Tecnología utilizada en el tratamiento del agua para destruir microorganismos mediante la irradiación con luz UV, sin añadir productos químicos al agua.

NOM-127-SSA1-2021: Norma Oficial Mexicana que establece los límites permisibles de calidad y tratamiento del agua para consumo humano, aplicable al diseño de plantas purificadoras y sistemas de monitoreo.

Ósmosis Inversa: Tecnología avanzada de purificación de agua que elimina contaminantes mediante el uso de una membrana semipermeable que retiene partículas no deseadas mientras deja pasar el agua pura.

Sedimentación: Proceso físico mediante el cual las partículas sólidas suspendidas en el agua se depositan en el fondo de un tanque o recipiente debido a la gravedad.

Sensor de Efecto Hall: Tecnología utilizada en dispositivos como el sensor de flujo YFS201 para medir el flujo del agua detectando pulsos generados por el movimiento de una turbina interna.

Sensor de Nivel Ultrasónico: Dispositivo que mide la distancia entre un punto fijo y la superficie del agua mediante la emisión y recepción de ondas ultrasónicas, transformando esta medición en datos de nivel o volumen.

Trazabilidad: Capacidad de rastrear el origen, tratamiento y distribución del agua en una planta purificadora, garantizando el cumplimiento normativo y la calidad del producto.

Turbidez: Medida de la claridad del agua determinada por la cantidad de partículas suspendidas en ella, considerada un parámetro importante en la evaluación de la calidad del agua.

Volumen de Tanque: Cantidad total de agua contenida en un tanque de almacenamiento, calculada a partir del nivel del agua y las dimensiones geométricas del tanque (en este caso, un cono truncado invertido).

Tratamiento de Agua: Conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para mejorar la calidad del agua cruda y convertirla en agua potable apta para el consumo humano.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad del agua, que debe mantenerse dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 para garantizar la calidad y seguridad del agua potable.

Tubería de PVC: Material utilizado para la conducción del agua en sistemas de purificación y distribución debido a su resistencia a la corrosión y bajo costo.

Normativa Sanitaria: Requisitos legales que establecen estándares de calidad y procedimientos para garantizar la seguridad del agua potable y proteger la salud pública.

Cono Truncado Invertido: Geometría del tanque utilizado en este proyecto, caracterizada por una base mayor y una base menor, cuya forma permite un cálculo preciso del volumen mediante interpolación lineal.

Interpolación Lineal: Método matemático utilizado en este proyecto para estimar el volumen del agua en el tanque a partir de las medidas del nivel sensado.

Distribución del Agua: Proceso de transporte del agua tratada desde la planta purificadora hasta los puntos de consumo, que incluye sistemas de tuberías, válvulas y bombas.

Sistema de Monitoreo: Conjunto de herramientas y tecnologías que permiten la medición y análisis en tiempo real de variables como el flujo, el nivel y la calidad del agua, optimizando la operación de la planta.

1. Introducción

El agua es quizás el recurso mas valioso en el planeta, no por su precio en el mercado si no por la importancia y el papel que este juega en la sociedad ya que este es un liquido vital para muchas actividades humanas como agricultura, industria y el mas importante el consumo humano, este recurso además de indispensable es limitado por lo cual monitorearlo es indispensable para eficientar actividades como la purificación del liquido, las plantas purificadoras de agua son las encargadas de realizar esta tarea, muchas de estas plantas potabilizadoras no cuentan con algún sistema que permita monitorizar el agua que se usa, la Dirección de Incubacion de Empresas del IPN cuenta con una de estas plantas por lo que se convierte en un entorno perfecto para el desarrollo de prototipo relacionados al monitoreo del recurso hídrico, el monitoreo de una operación como esta puede ayudar al rendimiento de la materia prima, así como prevenir el sobrellenado o el vacío excesivo de los tanques para proteger las bombas. El presente trabajo se enfoca en la planta purificadora de la DIET pero la similitud de este complejo con las purificadoras locales que encontramos comúnmente en el país hace que el sistema puede ser implementable en cualquier otra purificadora, el monitoreo que propone el trabajo se centrara principalmente en 2 variables, el nivel de agua en los tanques y el flujo sobre las tuberías, los datos recopilados serán mostrado a traves de una interfaz grafica la cual mostrara los datos en tiempo real, es importante destacar que la planta purificadora de la DIET no cuenta actualmente con ningún sistema de este tipo, las medidas de nivel son tomadas de manera visual y anotadas en formato de papel.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General:

Desarrollar un prototipo de sistema de monitoreo de flujo y almacenamiento de agua utilizando una tarjeta de adquisición de datos y una interfaz gráfica de usuario para garantizar un monitoreo eficiente del recurso hídrico.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos para recopilar información sobre el flujo, nivel y consumo de agua en la purificadora.
- Configurar el modulo de adquisición de datos para la comunicación con los sensores y dispositivos.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario (IGU) para visualizar y analizar los datos recopilados.
- Implementar gráficos y tablas para la visualización de datos e históricos.
- Integrar el sistema de adquisición de datos con la IGU para proporcionar una solución completa de monitoreo.
- Realizar pruebas de funcionamiento para verificar la precisión y confiabilidad del sistema.

1.2 Justificación

El proceso de purificación del agua consta de varias etapas que requieren un flujo constante de agua para garantizar su distribución desde el medio de almacenamiento hasta la obtención del agua purificada apta para el consumo humano, en dicho proceso el agua tiene un flujo a través de distintas tuberías lo que puede dificultar la posibilidad de identificar cualquier anomalía en el flujo y anteponerse a las adversidades futuras. El suministro constante de agua es esencial para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema de purificación, evitando desbordamientos o escasez, y permitiendo que el personal tome decisiones informadas sobre la gestión del agua y mantenimiento de las instalaciones. La falta de un sistema de monitoreo facilita la aparición de ineficiencias operativas, pérdidas de agua, problemas de obstrucción, desvío de recursos, etc. Nuestra solución tentativa es desarrollar un prototipo funcional de un sistema de monitoreo con una interfaz gráfica que permita el monitoreo del nivel y almacenamiento en los tanques de agua instalados en una purificadora local. La interfaz proporcionará datos precisos ilustrados gráficamente para ayudar a los operadores a tomar decisiones informadas y garantizar un suministro constante de agua. La combinación de tecnología de monitoreo y una interfaz gráfica para el control visual es innovadora y no se ha implementado ampliamente en este contexto. Al usar tecnologías de monitoreo del flujo de agua no solo beneficia a la calidad del producto final, sino que también es un paso hacia la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Estas tecnologías minimizan los desperdicios al evitar desbordamientos y pérdidas innecesarias de agua. Además, optimizan el consumo de recursos, lo que se traduce en una reducción de costos operativos y una huella ambiental más pequeña. Dicho lo anterior los beneficiados directos con nuestro sistema de monitoreo son las purificadoras de agua, el personal a cargo de la gestión del agua y, en última instancia, la comunidad que depende de un suministro constante de agua purificada. Nuestra solución tiene un alto interés para cualquier entidad que opere sistemas de purificación de agua y busque la optimización de sus recursos. Con nuestro proyecto buscamos mejorar la gestión del agua en plantas purificadoras proporcionando un monitoreo preciso, lo que garantizará informar al personal correspondiente en caso de presentarse desbordamientos y escasez, y así lograr la menor pérdida de agua posible. Esto representa una mejora significativa con respecto a las prácticas actuales, que a menudo se basan en mediciones manuales periódicas y pueden ser propensas a errores o inclusive no se practica ningún método similar. Para lograr el desarrollo de nuestro prototipo requerimos la aplicación de conocimientos técnicos en electrónica, sensores, programación y diseño de interfaz de usuario. La complejidad radica en la integración de estas diversas disciplinas para crear una solución efectiva y precisa. El proyecto es factible en términos de tiempos, recursos, alcances y costos. La tecnología necesaria para la implementación está disponible en el mercado y contamos con el tiempo suficiente para el desarrollo del prototipo. Los recursos necesarios, como sensores, software de programación y hardware, son asequibles y disponemos de una gran variedad de opciones en el mercado. Mantendremos el alcance de nuestro proyecto bajo control a través de una planificación adecuada, y los costos serán manejables dentro de un presupuesto razonable. En resumen, este proyecto ofrece una solución innovadora y valiosa para abordar un problema real en una purificadora local establecida. La combinación del monitoreo y una interfaz gráfica representa una mejora significativa en la eficiencia operativa y la toma de decisiones informadas. Además, la viabilidad del proyecto en términos de recursos y costos lo convierte en una propuesta sólida y beneficiosa para los usuarios potenciales y la comunidad en general.

1.3 Monitoreo para eficiencia

El monitoreo en tiempo real es un pilar fundamental para mejorar la eficiencia en los sistemas industriales. Este enfoque permite recopilar, analizar y actuar sobre datos clave de las operaciones, lo que conduce a una optimización continua de procesos, reducción de desperdicios, ahorro energético y mejoras significativas en la productividad. La integración de tecnologías avanzadas de monitoreo no solo asegura el cumplimiento de los objetivos operativos, sino que también responde a las exigencias de sostenibilidad y competitividad en un entorno industrial dinámico (*IEEE, 2024*). El Rol del Monitoreo en la Eficiencia Operativa El monitoreo en sistemas industriales incluye la observación y análisis de múltiples variables, tales como flujo, nivel, temperatura, presión y consumo energético. Estas mediciones permiten identificar ineficiencias, prevenir fallos y optimizar la asignación de recursos. Por ejemplo, en plantas de tratamiento de agua, los sistemas de monitoreo permiten gestionar de manera precisa el consumo de agua y energía, mientras se asegura la calidad del producto final. Además, la implementación de sistemas de monitoreo basados en Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos en tiempo real ha transformado la forma en que se gestionan los procesos industriales. Tecnologías como sensores avanzados, inteligencia artificial y plataformas de visualización habilitan un control más granular y una respuesta inmediata a cambios en las condiciones del sistema (Emerson Automation Solutions, 2023).

Beneficios del Monitoreo

- Optimización de Recursos: La medición continua ayuda a evitar el uso excesivo de insumos como agua, energía y materia prima, lo que reduce costos operativos y el impacto ambiental
- Detección Temprana de Fallos: Los sistemas de monitoreo identifican anomalías y posibles problemas antes de que escalen, minimizando los tiempos de inactividad no planificados.
- Mejora en la Toma de Decisiones: Los datos recopilados permiten a los operadores y gerentes tomar decisiones basadas en información objetiva y precisa.
- Cumplimiento Normativo y Sostenibilidad: En sectores regulados, como el tratamiento de agua, el monitoreo asegura el cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad.
- Reducción de Desperdicios: Al analizar los datos en tiempo real, se pueden implementar ajustes que minimicen desperdicios durante los procesos.

2. Marco Teórico

Este marco abarca conceptos clave, procesos, tecnologías y normativas que permiten comprender el contexto técnico y científico en el cual se implementará el sistema propuesto. Cada sección aborda aspectos específicos que respaldan las decisiones tomadas durante el diseño e implementación del prototipo.

2.1 Planta Purificadora

En los últimos años, el término “plantas purificadoras de agua” ha ganado notoriedad. Aunque inicialmente podría asociarse a un proceso industrial de gran escala —lo cual no está del todo fuera de lugar—, este concepto se refiere a un procedimiento físico y químico implementado por el ser humano. A través de un sistema de filtración múltiple y un mecanismo de esterilización bacteriana, se transforma el agua en un recurso purificado, apto para el consumo humano, por lo que los locales que encontramos comúnmente en la calle son considerados plantas de purificación. "Los sistemas privados para purificación del agua pueden clasificarse en cuatro categorías: distribución domiciliaria, purificadoras comerciales, empresas de tratamiento de agua y corporaciones que envasan agua mediante procesos automatizados, con mínima intervención humana" (Instituto Politécnico Nacional, 2023)[1]. Estas instalaciones son las responsables de suministrar agua de calidad a su entorno por lo que la gestión y administración de estas plantas es vital para mejorar el uso del recurso líquido, es importante mencionar que estos establecimientos están sujetos a estándares nacionales así como también a internacionales como los estándares ISO o ASHRAE este último americano, algunos de estos se discutirán en capítulos posteriores

2.1.1 Proceso de purificación

El proceso de purificación en plantas de agua es esencial para garantizar la eliminación de contaminantes y obtener agua apta para el consumo humano. Estas instalaciones emplean diversas etapas combinando procedimientos físicos, químicos y, en algunos casos, biológicos, optimizados con tecnología avanzada. A continuación, se describen las etapas más comunes del proceso de purificación.

Etapas comunes del Proceso de Purificación:

1. **Pretratamiento:** El pretratamiento consiste en eliminar partículas grandes, sedimentos y materia orgánica a través de filtros gruesos. En esta etapa, se realiza un análisis inicial del agua para determinar su calidad y composición.
2. **Filtración:** El agua pasa por sistemas de filtración de múltiples capas, como filtros de arena, grava o carbón activado. Estos eliminan partículas finas, olores y sabores indeseables, además de algunos compuestos químicos. El carbón activado es particularmente eficaz para absorber cloro y compuestos orgánicos.
3. **Suavización del agua:** Este paso reduce la dureza del agua mediante un proceso de intercambio iónico, eliminando minerales como calcio y magnesio. La suavización previene la formación de sarro en tuberías y mejora la calidad del agua.

4. **Ósmosis inversa:** En este punto, el agua es sometida a un sistema de membranas semipermeables que elimina hasta el 99% de las impurezas disueltas, incluidos metales pesados, bacterias y sales. Este proceso es uno de los más efectivos y representa el corazón de la purificación en muchas plantas modernas.
5. **Esterilización:** Finalmente, el agua pasa por un proceso de desinfección para garantizar la eliminación total de microorganismos patógenos. Las tecnologías más comunes incluyen luz ultravioleta (UV) y la dosificación controlada de cloro u ozono.
6. **Envasado o distribución:** Una vez purificada, el agua se envasa en botellas de plástico o se distribuye a través de sistemas de llenado directo. Este paso incluye controles de calidad para garantizar que el agua cumpla con las normativas sanitarias.

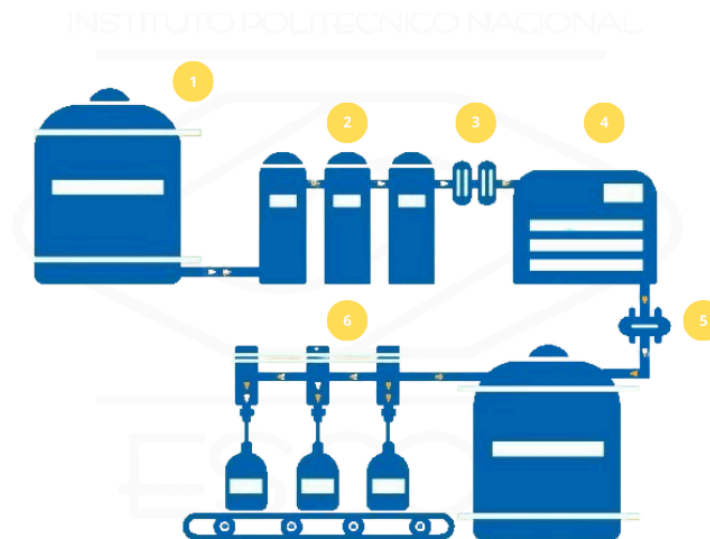


Figura 1. Proceso de Purificación

El proceso de purificación combina métodos avanzados como la ósmosis inversa, que garantiza la eliminación de hasta el 99% de las impurezas (Tu Planta Purificadora, 2025)[2]. Por otro lado, la esterilización mediante luz ultravioleta asegura la eliminación de microorganismos patógenos (Agua Inmaculada, 2025).[3] Las plantas purificadoras no solo garantizan agua potable para el consumo humano, sino que también contribuyen a la protección ambiental al reducir el uso de botellas desechables y promover sistemas de distribución más sostenibles. Además, representan una solución viable en regiones con acceso limitado a agua limpia.

2.1.2 Planta Purificadora de la DIET

La Planta Purificadora de Agua del Instituto Politécnico Nacional (IPN) ubicada en Manuel Carpio sin número,, esquina Ave de los Maestros, Colonia Sto Tomás, 11340 Colonia Sto Tomás, CDMX representa un avance significativo en la integración de tecnología, innovación y sustentabilidad dentro de una institución académica. Inaugurada el 21 de septiembre de 2021, esta instalación se ha consolidado como un referente en la implementación de modelos de negocio sostenibles y en la transferencia tecnológica. Además de satisfacer las necesidades de consumo de agua potable en diversas dependencias del IPN, esta planta se posiciona como un espacio para la formación profesional y el desarrollo de nuevas tecnologías, promoviendo la economía circular en sus operaciones. Este proyecto refuerza el compromiso del IPN con el

derecho humano al agua, considerado un bien social y cultural. Bajo esta premisa, se garantiza agua de alta calidad para los centros de desarrollo infantil (CENDIS) y otras unidades politécnicas. La planta también busca prolongar la vida útil del agua mediante el desarrollo de nuevas metodologías para conservar su inocuidad microbiológica por más tiempo.

Innovación y Sustentabilidad El modelo de la planta combina estrictos estándares de calidad con la implementación de sistemas certificados bajo normativas como la ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45000. Asimismo, cumple con las Normas Oficiales Mexicanas, incluyendo la NOM-251-SSA-2015 para buenas prácticas de manufactura y la NOM-127-SSA1-2021, que regula la calidad del agua potable como materia prima. Según Peñaloza Espinosa, coordinador del proyecto, la planta es un ejemplo de cómo un entorno productivo puede convertirse en un espacio propicio para la capacitación y la transferencia de conocimiento tecnológico (IPN, 2023)[4].

Proceso de Producción El proceso de purificación en la planta inicia con la llegada de pipas de agua, las cuales son inspeccionadas rigurosamente para garantizar que cumplen con estándares de calidad. Una vez descargada, el agua pasa por las siguientes etapas:

1. **Filtración** El agua atraviesa filtros de arena y carbón activado, eliminando partículas sólidas, cloro y compuestos orgánicos que puedan afectar el sabor, olor o color del agua. Posteriormente, se utiliza un filtro de pulido para retener cualquier partícula residual.
2. **Desinfección y Tratamiento Avanzado** El agua es tratada con ozono y luz ultravioleta, métodos que garantizan la eliminación de microorganismos patógenos, incluidos los resistentes al cloro.
3. **Control de Calidad** Cada lote de agua es sometido a análisis fisicoquímicos y microbiológicos para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos.
4. **Envasado y Logística** Los garrafones son lavados con detergente biodegradable y clorado antes de ser llenados con agua purificada. Luego se sellan con etiquetas que indican la fecha de producción y caducidad, garantizando trazabilidad. Actualmente, la planta distribuye alrededor de 800 garrafones de 20 litros semanalmente en 67 dependencias del IPN.



Figura 2. Proceso de producción Planta DIET

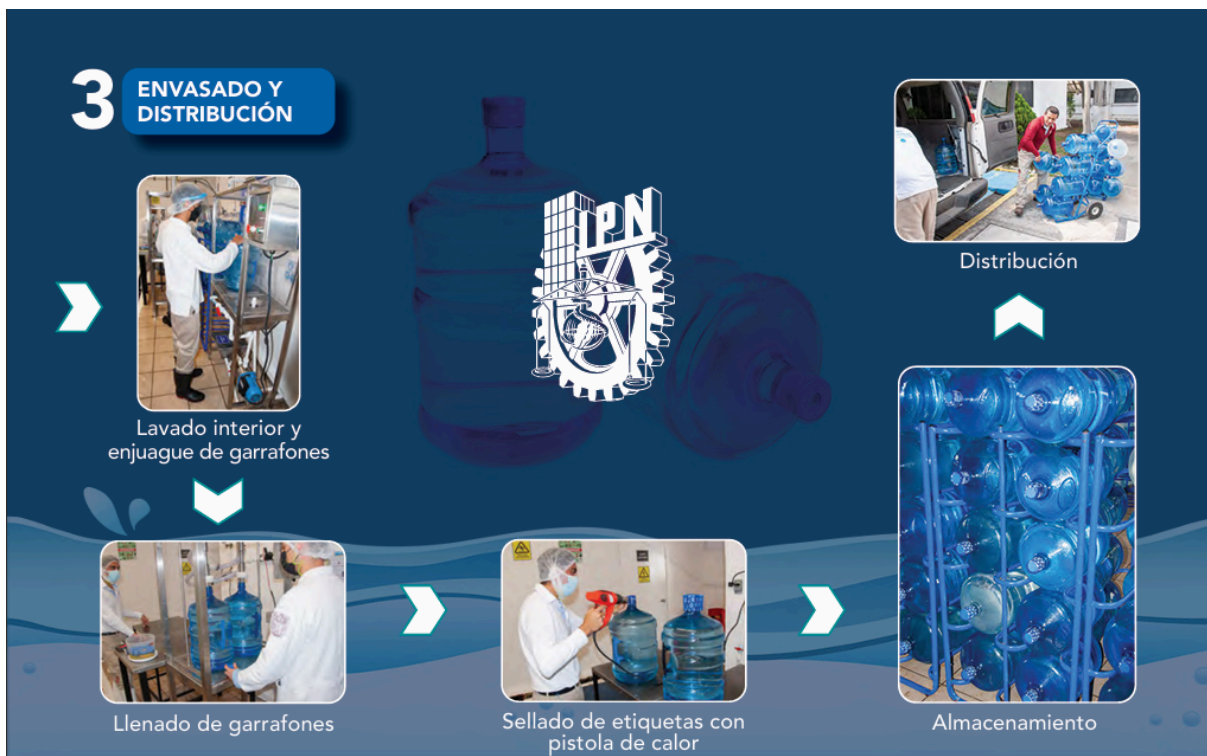


Figura 3. Proceso de producción Planta DIET

La Planta Purificadora de Agua del IPN es un modelo innovador que combina sustentabilidad, tecnología y compromiso social. Su enfoque en la economía circular y la transferencia de conocimiento la posicionan como un referente en la gestión del agua dentro de instituciones educativas, esto la hace perfecta para probar un sistema de monitoreo como el que se propone en el presente trabajo[8].

2.1.3 Monitoreo en la Planta

Actualmente, la Planta Purificadora de Agua del Instituto Politécnico Nacional (IPN) opera sin un sistema automatizado de monitoreo continuo del producto. La inspección del agua se realiza de manera visual y los datos relacionados con los parámetros de calidad son registrados manualmente en formatos de papel. Este método, aunque funcional, presenta limitaciones importantes:

- Falta de precisión y continuidad: La supervisión visual puede omitir variaciones sutiles en los parámetros del agua, como cambios en el nivel de cloro residual o contaminantes invisibles al ojo humano.
- Riesgos de pérdida de información: Al depender de registros en papel, existe una alta probabilidad de errores, deterioro o pérdida de datos.
- Incapacidad para monitoreo en tiempo real: No se dispone de herramientas para identificar de manera inmediata cualquier desviación en la calidad del agua, lo que podría poner en riesgo la inocuidad del producto.

La integración de sensores de monitoreo avanzados podría mejorar significativamente la operación de la planta. De acuerdo con ScienceDirect, los sensores de monitoreo del agua, desde instrumentos piezométricos simples hasta Perfiladores Acústicos de Corriente Doppler (ADCPs), pueden proporcionar datos esenciales en tiempo real, facilitando tanto el análisis del producto como el cumplimiento de normativas (Elias Dimitriou, in Environmental Water Requirements in Mountainous Areas, 2021)[5].

2.1.4 Variables de Interés

El monitoreo de variables operativas es esencial para asegurar la eficiencia y sostenibilidad de una planta purificadora de agua. En particular, el control del flujo del agua y del nivel en los tanques de almacenamiento constituye la base de un sistema operativo confiable. Estas variables no solo afectan la capacidad de producción y la calidad del agua, sino que también tienen un impacto directo en la optimización de recursos y la sostenibilidad ambiental.

Equipamiento y Contexto Operativo La Planta Purificadora de Agua del Instituto Politécnico Nacional (IPN) cuenta con dos tanques KVPlast con capacidad de 5000 litros cada uno, conectados por tuberías de 1 pulgada. La bomba utilizada es el modelo AQUA PAK FIX10E, diseñada para manejar un rango de flujo de 10 a 40 litros por minuto con una carga hidráulica de 24 a 40 metros. Este equipo opera a 3450 revoluciones por minuto y ofrece un rendimiento confiable para satisfacer las demandas del sistema.

Variables de Interés

- **Flujo del Agua** El flujo del agua es una variable crítica para garantizar el correcto funcionamiento de las etapas de purificación, que incluyen filtración, desinfección y distribución.

Importancia: El control preciso del flujo permite mantener la eficiencia energética y prolongar la vida útil de los equipos. Además, asegura que los procesos cumplen con los estándares de calidad requeridos para el agua potable. Según Waltero (2024)[6], el monitoreo en tiempo real de parámetros como el flujo y la calidad del agua es fundamental para proteger los sistemas de distribución y garantizar la seguridad del consumidor.

Monitoreo Propuesto: La integración de sensores de flujo digitales en puntos clave de la red de tuberías permitiría la medición continua del caudal. Esto no solo optimizaría la operación de la bomba, sino que también facilitaría la detección temprana de anomalías, como bloqueos o fluctuaciones en el suministro.

- **Nivel en los Tanques de Almacenamiento** El nivel de agua en los tanques de almacenamiento determina la continuidad del proceso de purificación y evita interrupciones en la producción.

Importancia: Un monitoreo constante del nivel en los tanques puede prevenir tanto desbordamientos como fallas por falta de agua. Además, contribuye a una mejor gestión de los recursos hídricos, promoviendo prácticas sostenibles (*SmartWaterOnline*, 2024)[7].

Monitoreo Propuesto: Sensores ultrasónicos o de flotador electrónico podrían ser instalados para medir el nivel de agua en tiempo real. Estos dispositivos ofrecen alertas automáticas cuando los niveles están fuera de los rangos establecidos, optimizando la operación de llenado y evitando pérdidas de agua.

El monitoreo automatizado del flujo y nivel de agua en plantas purificadoras es esencial para optimizar la operación del producto. - Al prevenir pérdidas de agua y reducir el consumo energético, la planta se alinea con prácticas sostenibles que disminuyen su huella ecológica (*SmartWaterOnline*, 2024). La integración de sensores avanzados en la Planta Purificadora del IPN fortalecería su sostenibilidad operativa y promovería la innovación tecnológica como un modelo a seguir en el sector.

2.2 Sistemas de Monitoreo

Los sistemas de monitoreo son herramientas esenciales en la gestión de procesos industriales y ambientales. Estos sistemas permiten la supervisión continua y en tiempo real de variables críticas, proporcionando datos precisos para la toma de decisiones, la optimización de recursos y el cumplimiento de normativas. En el contexto de plantas purificadoras de agua, estos sistemas tienen un impacto significativo en la eficiencia operativa y la calidad del producto.

Aplicaciones Generales de los Sistemas de Monitoreo

El monitoreo de diversos sectores industriales es fundamental para garantizar eficiencia, seguridad y sostenibilidad. En el ámbito de la energía y las redes eléctricas, los sistemas de monitoreo se enfocan en supervisar el consumo energético, la generación de electricidad y la detección de fallos en las redes. Estos sistemas optimizan el suministro, reducen costos y

mejoran la confiabilidad operativa, asegurando un funcionamiento continuo y eficiente (*Emerson, 2024*)[8].

En la industria manufacturera, el monitoreo de las líneas de producción es clave para garantizar la calidad, eficiencia y seguridad en cada etapa del proceso. La implementación de estos sistemas incrementa la productividad, reduce desperdicios y asegura el cumplimiento de estándares internacionales, como la ISO 9001, fortaleciendo la competitividad de las empresas en el mercado global (*ISO, 2023*)[9].

En el transporte e infraestructura, el monitoreo se utiliza para gestionar el tráfico, evaluar las condiciones estructurales y medir el consumo de combustible. Este enfoque mejora la seguridad, permite una planificación eficiente del tráfico y contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, alineándose con objetivos de sostenibilidad y movilidad inteligente (*SmartWaterOnline, 2024*) [10].

Por otro lado, en la gestión ambiental, los sistemas de monitoreo tienen un impacto significativo en la protección de recursos naturales. El monitoreo en tiempo real de la calidad del aire, agua y suelo proporciona datos cruciales para cumplir con normativas ambientales y responder rápidamente a emergencias ecológicas. Estas tecnologías, ampliamente utilizadas en sectores como el tratamiento de agua, son promovidas por líderes tecnológicos como *Endress+Hauser* (2024)[11], quienes destacan su papel en la sostenibilidad y el cumplimiento regulatorio. En conjunto, los sistemas de monitoreo representan una herramienta esencial para la optimización operativa y la sostenibilidad en múltiples sectores, adaptándose a las necesidades específicas de cada industria.

Aplicaciones en Plantas Purificadoras de Agua

En el tratamiento de agua, los sistemas de monitoreo permiten supervisar y controlar cada etapa del proceso, asegurando un producto final de calidad que cumpla con las regulaciones sanitarias.

- **Flujo de Agua** Sensores de flujo electromagnéticos y ultrasónicos son utilizados para medir la velocidad del agua en las tuberías, lo que garantiza una distribución uniforme durante el tratamiento.
- **Nivel en Tanques de Almacenamiento** Los sensores ultrasónicos y de presión hidrostática permiten monitorear la cantidad de agua en los tanques. Esto evita desbordamientos o interrupciones en el suministro, optimizando el balance entre carga y descarga.
- **Calidad del Agua** Sensores especializados monitorean parámetros como el pH, la turbidez, el cloro residual y la conductividad, asegurando que el agua procesada cumpla con normas como la NOM-127-SSA1-2021.
- **Gestión Energética y Mantenimiento Predictivo** Los sistemas de monitoreo registran el rendimiento de bombas, motores y otros equipos. Esta información es crucial para programar mantenimientos preventivos, evitar fallos inesperados y reducir costos operativos.

Beneficios de los Sistemas de Monitoreo

En la Planta Purificadora de Agua del Instituto Politécnico Nacional (IPN), la incorporación de sistemas de monitoreo avanzados permitiría optimizar procesos clave como el control del flujo de agua, los niveles en los tanques y la calidad del agua purificada. Esto garantizaría una operación eficiente, reduciendo tiempos de inactividad y maximizando el uso de recursos. Estos sistemas asegurarían el cumplimiento normativo, como la NOM-127-SSA1-2021, al automatizar el seguimiento de parámetros críticos, fortaleciendo la confiabilidad del producto final. Además, promoverían la sostenibilidad al reducir el desperdicio de agua y energía, alineándose con los principios de economía circular. En cuanto a la seguridad, el monitoreo continuo detectaría riesgos operativos antes de que se conviertan en fallos, protegiendo tanto los procesos como la calidad del agua suministrada. Esto posicionaría a la planta como un modelo eficiente y sostenible, en línea con los objetivos de innovación del IPN.

2.3 Tarjeta de adquisición de datos

Las tarjetas de adquisición de datos son dispositivos esenciales en la recopilación y procesamiento de señales físicas y electrónicas, fundamentales para el control, monitoreo y análisis de sistemas complejos. Estas tarjetas, típicamente utilizadas en combinación con sistemas embebidos, permiten capturar información de sensores y dispositivos externos, digitalizarla y transmitirla a una computadora u otro controlador para su procesamiento.

Sistemas Embebidos

Un sistema embebido se define como un conjunto de hardware y software diseñado para llevar a cabo funciones específicas dentro de un sistema mayor. A diferencia de los sistemas de propósito general, los sistemas embebidos están integrados en un entorno concreto, ya sea mecánico, digital o analógico, y se utilizan ampliamente en aplicaciones como el monitoreo ambiental, la robótica, la medicina y la industria aeroespacial (*Posch, 2019*)[12]. Entre los componentes clave de los sistemas embebidos se encuentran los microcontroladores, dispositivos que integran una unidad de procesamiento central (CPU), memoria y entradas/salidas (I/O) en un solo chip. Estos microcontroladores permiten la implementación de funciones específicas, como el manejo de sensores y actuadores, y su eficiencia, tamaño reducido y bajo consumo energético los hacen ideales para aplicaciones en las que se requiere un control preciso y continuo.

Microcontroladores y Tarjetas de Adquisición de Datos

Los microcontroladores (MCUs) son dispositivos compactos que combinan una unidad de procesamiento central (CPU), memoria y entradas/salidas (I/O) en un solo chip. Diseñados para realizar tareas específicas, estos dispositivos son ideales para sistemas embebidos donde el tamaño reducido, la eficiencia energética y el bajo costo son esenciales.

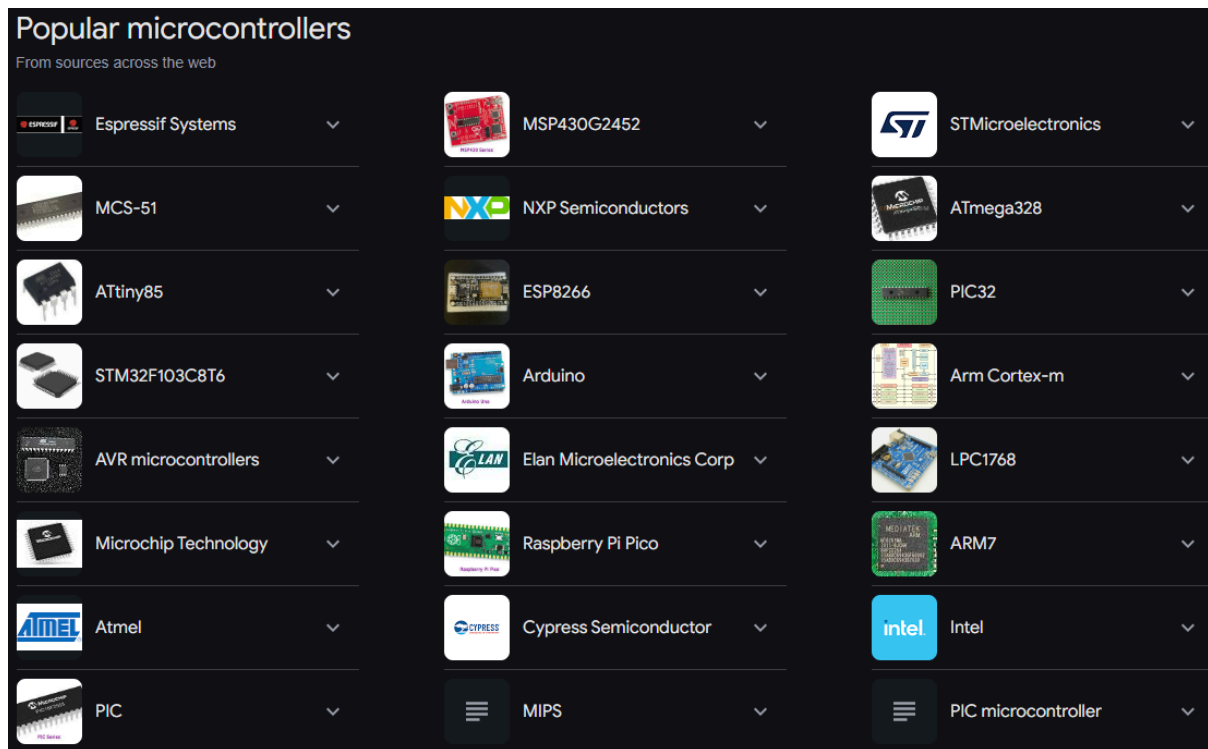


Figura 4. Microcontroladores Populares

Entre los microcontroladores más utilizados en sistemas de adquisición de datos se encuentran:

1. ESP32

El ESP32 es un microcontrolador desarrollado por Espressif Systems, conocido por su conectividad integrada y alta capacidad de procesamiento. Este dispositivo ofrece:

- **Conectividad Wi-Fi y Bluetooth:** Ideal para aplicaciones IoT y sistemas distribuidos.
- **Arquitectura de doble núcleo:** Con velocidades de hasta 240 MHz, supera a muchos microcontroladores tradicionales en capacidad computacional.
- Pines GPIO multifuncionales: Permite conectar una amplia gama de sensores y dispositivos.
- Eficiencia energética: Diseñado para operar en entornos con recursos limitados.

El ESP32 se utiliza ampliamente como tarjeta de adquisición de datos en aplicaciones como monitoreo ambiental, automatización industrial y tratamiento de agua. Su capacidad para recopilar datos y transmitirlos en tiempo real a plataformas en la nube lo convierte en una opción versátil y económica (Posch, 2019).

2. AVR Los microcontroladores AVR, desarrollados por Atmel (ahora parte de Microchip), son conocidos por su simplicidad y bajo consumo de energía. Ofrecen:
 - Arquitectura RISC de 8 bits: Optimizada para operaciones básicas de control.
 - Compatibilidad con lenguaje de programación C: Lo que facilita su adopción en proyectos pequeños.
 - Aplicaciones comunes: Automatización de dispositivos simples, sistemas de control básico y productos de consumo como electrodomésticos.
 - Aunque los AVR son menos potentes que los microcontroladores más modernos como el ESP32, siguen siendo populares en aplicaciones que no requieren conectividad avanzada o procesamiento intensivo.

3. **ARM Cortex-M** Los microcontroladores ARM Cortex-M son una familia de dispositivos basados en la arquitectura ARM, ampliamente utilizados en sistemas embebidos. Ofrecen:
 - **Escalabilidad:** Varían desde modelos básicos (Cortex-M0) hasta modelos avanzados (Cortex-M7) con mayor potencia de procesamiento.
 - **Eficiencia energética:** Diseñados para aplicaciones de bajo consumo, como dispositivos portátiles y sensores remotos.
 - **Amplia adopción:** Utilizados en sectores como automotriz, médico e industrial. Los ARM Cortex-M son ideales para aplicaciones de adquisición de datos que requieren mayor capacidad de procesamiento o integración con sistemas más complejos.
4. **PIC** Los microcontroladores PIC, desarrollados por Microchip, son conocidos por su robustez y flexibilidad. Ofrecen:
 - **Amplia variedad de modelos:** Desde dispositivos de 8 bits hasta procesadores de 32 bits.
 - **Alta confiabilidad:** Utilizados en aplicaciones críticas como sistemas médicos y automotrices.
 - **Interfaces periféricas:** Incluyen ADC (convertidores analógico-digital) y PWM (modulación por ancho de pulso) para controlar sensores y actuadores. Los PIC son una opción común en sistemas de adquisición de datos que requieren estabilidad a largo plazo y configuraciones específicas de hardware.
5. **Intel MCS-51 (8051)** El MCS-51, más conocido como 8051, es un microcontrolador clásico ampliamente utilizado desde su introducción en 1980. Aunque ha sido superado por microcontroladores más modernos, todavía se utiliza en aplicaciones específicas gracias a su simplicidad y disponibilidad. Ofrece:
 - **Arquitectura de 8 bits:** Adecuada para tareas de control básico.
 - **Configuración simple:** Ideal para proyectos de enseñanza y sistemas embebidos de bajo costo.

Una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) es un dispositivo que conecta sensores con sistemas computacionales, permitiendo la captura y digitalización de señales físicas[13]. En sistemas embebidos, los microcontroladores como el ESP32 pueden actuar como tarjetas de adquisición básicas, capturando datos de sensores analógicos y digitales y transmitiéndolos para su análisis.

El uso de microcontroladores como tarjetas DAQ ofrece varias ventajas:

- **Reducción de costos:** Al integrar funciones de adquisición en un solo chip, se eliminan componentes externos costosos.
- **Flexibilidad:** Los microcontroladores pueden ser programados para adaptarse a diferentes tipos de sensores y aplicaciones.
- **Conectividad en tiempo real:** Dispositivos como el ESP32 permiten transmitir datos directamente a plataformas en la nube, facilitando el monitoreo remoto.

2.4 Interfaz grafica de usuario

Las interfaces gráficas de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) son componentes fundamentales en los sistemas de monitoreo modernos, ya que permiten a los operadores interactuar con los datos y el estado de los sistemas de manera intuitiva y eficiente. Estas interfaces incluyen elementos como dashboards, gráficos y alertas, diseñados para ofrecer información clara y en tiempo real, optimizando la capacidad de toma de decisiones en entornos

complejos. Las GUI en sistemas de monitoreo son esenciales para traducir datos técnicos en representaciones visuales comprensibles. Elementos como gráficos en tiempo real, indicadores de rendimiento y tablas de resumen facilitan que los usuarios comprendan el estado actual de los sistemas y tomen decisiones informadas. Según Microsoft, las interfaces gráficas deben ser diseñadas teniendo en cuenta la usabilidad, la accesibilidad y la claridad para maximizar su efectividad en ambientes de monitoreo industrial y comercial (Microsoft, 2024)[14].

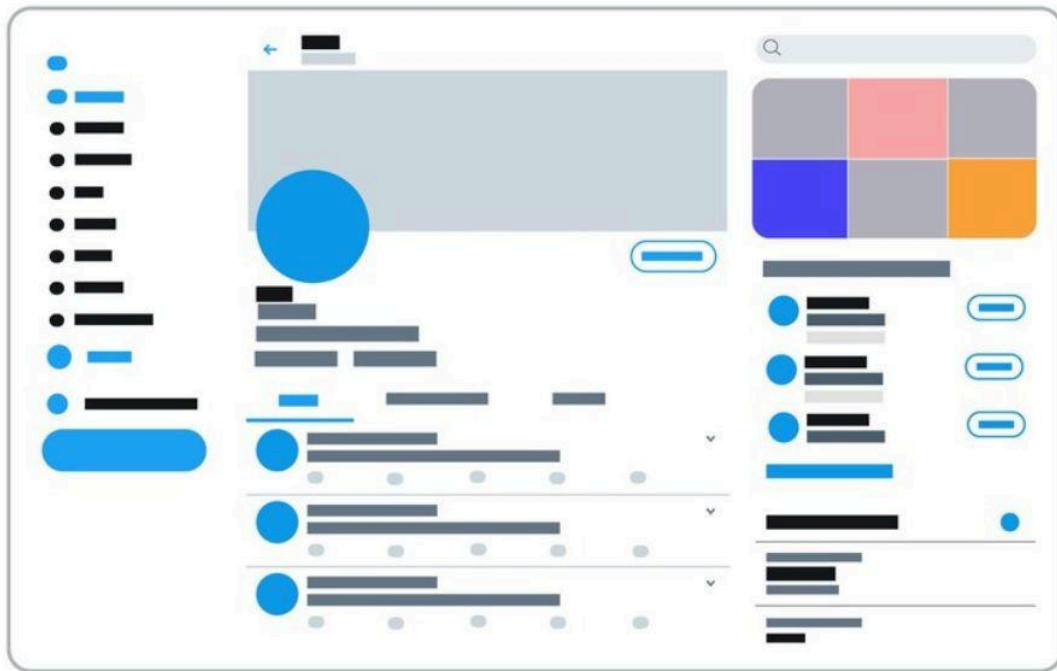


Figura 5. Ejemplo de una Interfaz Grafica (X antes Twitter)

Componentes de una GUI para Sistemas de Monitoreo

- **Dashboards** Los dashboards son paneles de control visuales que presentan información clave en un solo lugar. En sistemas de monitoreo, los dashboards consolidan datos de múltiples fuentes en gráficos y tablas interactivos, permitiendo una rápida evaluación del desempeño del sistema.

Características clave: Representación en tiempo real de variables críticas, como niveles, flujos y alarmas. Personalización para ajustar las métricas mostradas según las necesidades del usuario. Interactividad, permitiendo a los usuarios profundizar en detalles específicos con un solo clic. Según Visual Studio, los dashboards bien diseñados ayudan a los usuarios a centrarse en los problemas más relevantes, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo errores humanos (Visual Studio, 2024).

- **Alertas y Notificaciones** Los sistemas de monitoreo modernos incluyen mecanismos de alerta integrados en la GUI, que notifican a los operadores sobre problemas críticos o desviaciones de parámetros esperados. Estas alertas pueden configurarse como visuales, audibles o incluso enviarse a dispositivos móviles, lo que mejora la capacidad de respuesta ante situaciones críticas.

- **Gráficos y Visualizaciones** Las gráficas de líneas, barras y diagramas de dispersión son comunes en las GUI para representar tendencias históricas y datos en tiempo real. Estas visualizaciones hacen que los datos sean más fáciles de interpretar en comparación con tablas de texto.
- **Mapas Interactivos** En aplicaciones que requieren monitoreo geoespacial, las GUI pueden integrar mapas interactivos que muestren la ubicación y el estado de diferentes activos. Esto es especialmente útil en sistemas distribuidos, como redes de monitoreo ambiental.

Las interfaces gráficas de usuario (GUI) son intuitivas debido a su diseño visual claro, que utiliza jerarquías visuales para resaltar la información más importante y simplificar la navegación. Los elementos clave suelen representarse con colores brillantes o tamaños destacados para captar la atención del usuario, lo que facilita la interpretación rápida de los datos (*Microsoft, 2024*)[14]. Además, las GUI modernas fomentan la interactividad, permitiendo a los usuarios explorar tendencias, ajustar parámetros o responder a alertas directamente desde la interfaz. Esto minimiza la necesidad de conocimientos técnicos avanzados y mejora la experiencia del usuario.

Otra característica destacada de las GUI es su capacidad de personalización. Pueden adaptarse a diferentes perfiles de usuario, desde operadores de planta hasta gerentes, mostrando únicamente la información relevante para cada rol. Asimismo, las herramientas como Visual Studio permiten desarrollar interfaces gráficas con estándares de diseño consistentes, facilitando el aprendizaje y reduciendo errores operativos gracias a su estructura intuitiva y bien organizada (*Visual Studio, 2024*)[15].

Las aplicaciones de las GUI en sistemas de monitoreo son diversas y abarcan sectores clave. En el monitoreo de plantas industriales, estas interfaces permiten supervisar procesos en tiempo real, como temperatura, presión y flujo, mientras gestionan alarmas que ayudan a identificar y resolver problemas rápidamente. En el sector energético, las GUI son esenciales para visualizar el consumo energético y la generación de electricidad en tiempo real, además de detectar fallos y optimizar el suministro eléctrico. Por último, en el tratamiento de agua y saneamiento, las GUI facilitan el control de variables críticas como los niveles de agua, el pH y la turbidez, permitiendo también el monitoreo remoto para asegurar el cumplimiento normativo y la sostenibilidad operativa.

Tecnologías para el Desarrollo de Interfaces Gráficas de Usuario en Sistemas de Monitoreo

El diseño de interfaces gráficas de usuario (GUI) en sistemas de monitoreo es un aspecto esencial para garantizar que los usuarios puedan interactuar con los datos y controlar procesos de manera eficiente. Las GUI modernas requieren herramientas y frameworks robustos que ofrezcan flexibilidad, rendimiento y escalabilidad. Tecnologías como **Blazor**, **SyncFusion**, **React**, **Angular** y **Vue** han ganado prominencia al proporcionar soluciones avanzadas para la creación de interfaces interactivas y dinámicas, ideales para dashboards en tiempo real y sistemas de monitoreo complejos.

Blazor: Desarrollo con C# para la Web Blazor, desarrollado por Microsoft, es un framework que permite construir aplicaciones web utilizando C# en lugar de JavaScript. Este enfoque facilita la reutilización de lógica entre el cliente y el servidor, lo que lo hace ideal para sistemas integrados que requieren conectividad constante.

Ventajas principales: Reutilización del código en diferentes plataformas. Compatibilidad con herramientas avanzadas como Visual Studio. Ideal para aplicaciones en tiempo real que utilizan gráficos y dashboards. Blazor permite a los desarrolladores trabajar en un entorno familiar de .NET, lo que mejora la productividad y reduce la curva de aprendizaje para aquellos que ya están familiarizados con este ecosistema (Microsoft, 2024)[16].

SyncFusion: Controles Avanzados para Dashboards SyncFusion ofrece más de 80 componentes visuales diseñados para crear interfaces ricas e interactivas. Sus herramientas permiten la integración con frameworks como Blazor, React, Angular y Vue.

Características destacadas: Representación de grandes volúmenes de datos mediante gráficos y tablas. Personalización avanzada para adaptarse a necesidades específicas. Optimización para manejar datos en tiempo real en sistemas de monitoreo industrial. SyncFusion se ha consolidado como una solución líder gracias a su capacidad para simplificar la creación de interfaces visuales robustas y personalizables (SyncFusion, 2024)[17].

React: Flexibilidad y Popularidad React, desarrollado por Facebook, es una biblioteca de JavaScript altamente popular para construir interfaces de usuario. Su enfoque basado en componentes permite crear interfaces dinámicas y reutilizables.

Ventajas principales: Virtual DOM: Optimiza el rendimiento al reducir el tiempo de renderizado. Amplia Comunidad: Gran cantidad de bibliotecas y herramientas disponibles. Integración con backend: Compatible con APIs y frameworks de servidor. React es ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo debido a su capacidad para manejar actualizaciones frecuentes de datos en tiempo real y su flexibilidad para adaptarse a diferentes casos de uso.

Angular: Framework Integral para Aplicaciones Empresariales Angular, desarrollado por Google, es un framework completo para construir aplicaciones web dinámicas y robustas. Su enfoque estructurado lo hace ideal para proyectos empresariales que requieren escalabilidad y mantenimiento a largo plazo.

Ventajas principales: Data Binding Bidireccional: Sincroniza automáticamente los datos entre el modelo y la vista. Módulos y Servicios: Facilita la organización de aplicaciones complejas. Integración Nativa con TypeScript: Ofrece un entorno más seguro y controlado para el desarrollo. En sistemas de monitoreo, Angular es particularmente útil para aplicaciones que requieren integración con múltiples fuentes de datos y funcionalidades avanzadas como generación de reportes y análisis.

Vue: Simplicidad y Flexibilidad Vue es un framework progresivo de JavaScript que se adapta fácilmente a diferentes necesidades de desarrollo. Su enfoque modular lo hace ideal para proyectos que buscan un balance entre simplicidad y capacidad avanzada.

Ventajas principales: Curva de aprendizaje baja: Ideal para desarrolladores nuevos en frameworks de JavaScript. Composición Reactiva: Facilita la creación de interfaces dinámicas. Ecosistema robusto: Herramientas como Vue Router y Vuex para manejo de estados y rutas. Vue se ha ganado un lugar en aplicaciones de monitoreo debido a su flexibilidad y capacidad para integrarse con otras tecnologías sin añadir complejidad innecesaria.

Comparación entre tecnologías

Framework	Lenguaje Base	Ventajas	Casos de Uso
Blazor	C#	Reutilización de código, integración .NET	Dashboards en sistemas .NET
SyncFusion	Varios	Controles avanzados, gráficos, tablas	Interfaces ricas para grandes volúmenes de datos
React	JavaScript	Virtual DOM, flexibilidad, comunidad amplia	Dashboards en tiempo real
Angular	TypeScript	Framework completo, escalabilidad	Aplicaciones empresariales complejas
Vue	JavaScript	Simplicidad, reactividad	Aplicaciones dinámicas y ligeras

En conjunto, las GUI son herramientas indispensables para gestionar y visualizar datos de manera eficiente, ofreciendo un enfoque intuitivo y funcional que mejora la toma de decisiones y optimiza los sistemas de monitoreo en una variedad de industrias.

2.5 Medición de Nivel

La medición de nivel es una disciplina esencial en diversas industrias, ya que garantiza la seguridad y la eficiencia de los procesos. Este capítulo presenta una introducción detallada a los principios fundamentales de la medición de nivel, explicando su importancia, los conceptos clave y los criterios necesarios para seleccionar dispositivos adecuados.

La medición de nivel consiste en determinar la posición de una superficie dentro de un tanque, reactor u otro contenedor. Más precisamente, implica medir la distancia vertical entre un punto de referencia (generalmente la base del recipiente) y la superficie de un líquido o sólido, o la interfaz entre dos líquidos.

Importancia de la Medición de Nivel

- **Gestión de Inventario** El principal objetivo de la medición de nivel es mantener un control preciso del inventario. Esto es esencial para operadores, ejecutivos y gerentes responsables de la seguridad, la optimización de costos y la prevención de pérdidas. La precisión requerida generalmente es mejor que ± 3 mm para aplicaciones industriales estándar.
- **Transferencia Custodial** En las transacciones comerciales y legales, la transferencia de custodia depende en gran medida de la medición precisa del nivel, ya que este valor se convierte en volumen o peso utilizando tablas de calibración. En estos casos, la exactitud debe ser mejor que ± 1 mm para cumplir con normativas como el Manual API de Medición de Petróleo y la OIML R85.

- **Eficiencia en los Procesos** Un control preciso del nivel mejora la eficiencia al maximizar el uso de la capacidad de almacenamiento y reducir costos asociados a la adquisición de tanques adicionales.
- **Seguridad** La medición precisa del nivel es crucial para evitar derrames, sobrellenos y fallos catastróficos, especialmente en el manejo de materiales peligrosos. También permite detectar fugas y cumplir con normativas medioambientales.
- **Suministro Consistente** La constancia en el suministro de insumos es vital para mantener la calidad del producto en industrias como la celulosa y el papel, donde las variaciones pueden afectar la uniformidad del producto final.

Indicación vs. Control en la Medición de Nivel La medición de nivel puede llevarse a cabo mediante dos enfoques principales: indicadores de nivel y sistemas de control automáticos. Ambos métodos tienen aplicaciones específicas dependiendo de las necesidades del proceso y el nivel de automatización deseado.

Indicadores de Nivel

Los indicadores de nivel permiten realizar una verificación visual y local del nivel de un líquido o sólido en un recipiente. Este tipo de dispositivos requiere la interpretación manual del operador, quien debe tomar las acciones necesarias basándose en la lectura observada.

- **Características principales:**
 - Funcionan como parte de un sistema de control de bucle abierto.
 - Son ideales para aplicaciones donde se necesita una supervisión ocasional y no se requiere un monitoreo continuo automatizado.
 - A menudo se utilizan para **calibrar sistemas de control automáticos** en las etapas iniciales de implementación o mantenimiento.

Este método tiene la ventaja de ser simple y económico, pero depende directamente de la intervención humana, lo que puede introducir errores o retrasos en la operación.

Sistemas de Control Automáticos

Los sistemas automáticos, conocidos como sistemas de control de bucle cerrado, utilizan dispositivos de medición de nivel junto con transmisores electrónicos que generan una señal proporcional al nivel detectado en el recipiente. Esta señal es recibida por un controlador, que a su vez opera otros dispositivos, como válvulas o bombas, para regular el flujo de entrada y salida del producto en el contenedor.

- **Características principales:**
 - **Control Electrónico:** Permite un monitoreo constante del nivel y reacciones automáticas a cambios en el sistema.
 - **Integración:** Pueden incluir indicadores de nivel para proporcionar redundancia o soporte visual al sistema automático.
 - **Precisión y Eficiencia:** Reducen la dependencia de la intervención manual, mejorando la confiabilidad y la seguridad en aplicaciones críticas.
- **Aplicaciones comunes:**
 - Procesos que requieren un flujo constante y uniforme de materiales.
 - Industrias donde la precisión y la rapidez en la respuesta son cruciales, como el petróleo, el gas y la industria farmacéutica.

Comparación Visual:

Aspecto	Indicadores de Nivel	Sistemas Automáticos
Tipo de Control	Bucle abierto	Bucle cerrado
Intervención Humana	Requiere interpretación manual	Operación completamente automática
Aplicaciones	Supervisión ocasional	Procesos críticos y de alta precisión
Costo	Bajo	Medio a alto
Precisión y Consistencia	Limitada	Alta

Tabla 1. Control vs Indicación

Terminología Clave El control preciso del nivel de productos en un tanque o reactor requiere una comprensión adecuada de los términos clave. La medición de nivel puede expresarse en unidades de longitud, porcentaje de llenado o como un rango medido.

Medición Directa vs. Indirecta Medición Directa: Determina el nivel directamente, como con una varilla medidora. Medición Indirecta: Calcula el nivel a partir de variables como presión o densidad.

Medición de Nivel: Bottom-Up y Top-Down La medición desde arriba hacia abajo (top-down) implica un menor riesgo de fugas (Figura 6) y permite que los dispositivos de medición se instalen o retiren sin necesidad de vaciar el tanque, como ocurre con los medidores de radar. Este método puede incluir tecnologías que entren en contacto con el fluido del proceso o que no lo hagan. Por otro lado, los dispositivos de nivel que emplean transmisores de presión suelen operar bajo el principio de medición desde abajo hacia arriba (bottom-up). Este enfoque generalmente implica el contacto directo del sistema de medición con el fluido del proceso, como sucede en los sistemas de presión diferencial (DP).

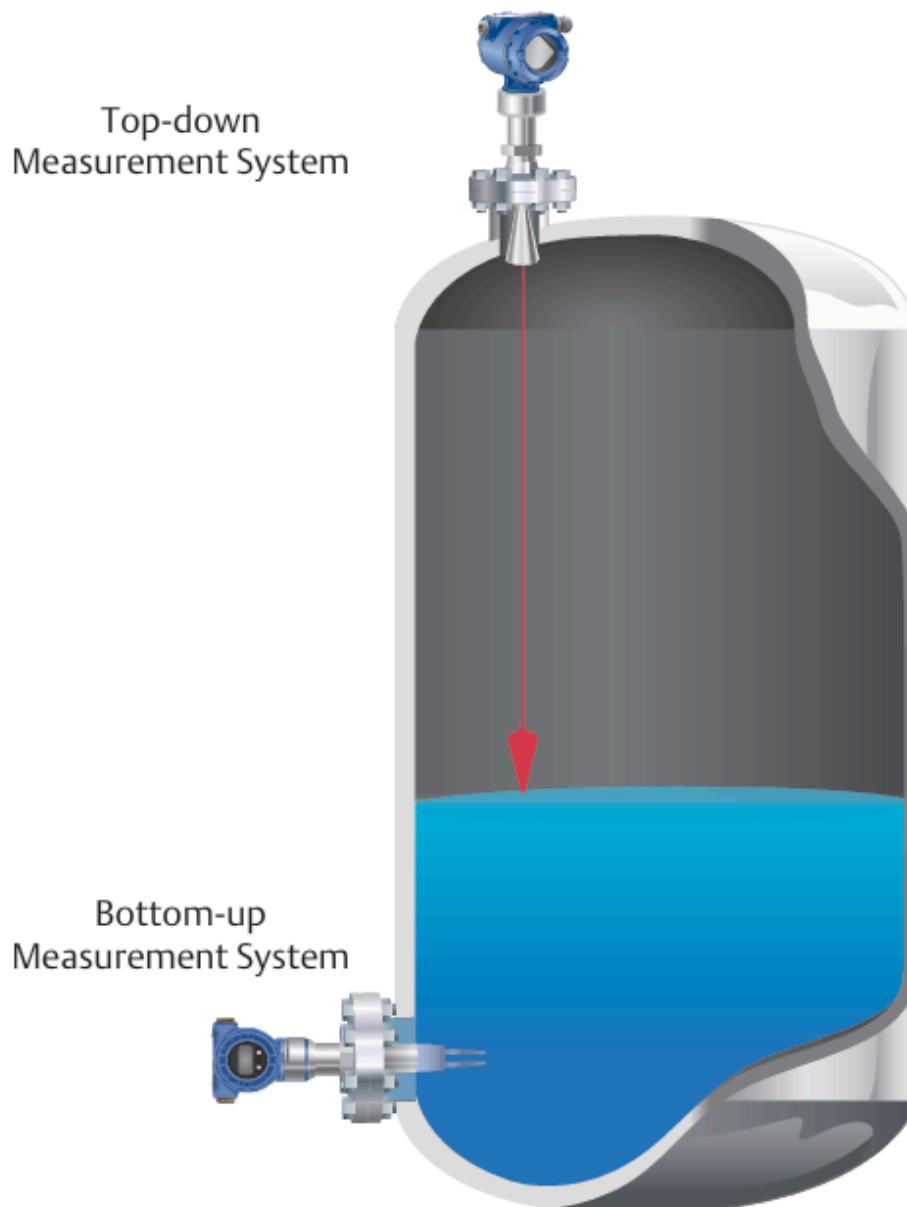


Figure 6. Medición Bottom-up vs. top-down

Densidad La densidad se define como la masa de un material por unidad de volumen y se expresa comúnmente en libras por pie cúbico (lb/ft^3) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). En ocasiones, se utiliza la gravedad específica para describir la densidad de un material en relación con la densidad del agua.

Gravedad Específica: La gravedad específica es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a una temperatura de referencia estándar. Por ejemplo, el agua tiene una densidad de 62.43 lb/ft³ (1 g/cm³) a 39.2 °F (4 °C). La glicerina, un compuesto comúnmente presente en jabones, tiene una densidad de 78.66 lb/ft³ (1.26 g/cm³) en las mismas condiciones. Por lo tanto, la gravedad específica de la glicerina es 1.26 (78.66 ÷ 62.43).

Volumen

El volumen se refiere al espacio ocupado por una cantidad determinada de material. A menudo, el nivel de un tanque se mide para calcular el volumen contenido, el cual se expresa generalmente en galones, litros, centímetros cúbicos, pies cúbicos o barriles.

Determinación del Volumen:

El volumen se calcula midiendo primero el nivel del producto en el tanque y utilizando la geometría del tanque para realizar los cálculos. Muchos dispositivos de medición de nivel almacenan la relación entre nivel y volumen para geometrías comunes en sus componentes electrónicos, lo que permite obtener una salida de volumen directa. En otros casos, el volumen se calcula mediante un sistema de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés) o un controlador lógico programable (PLC). También puede determinarse a través de tablas de consulta que relacionan nivel y volumen. Las relaciones matemáticas para calcular el volumen de tanques con formas comunes se resumen a continuación:

- $V = \text{Volumen del tanque}$
- $r = \text{Radio del tanque}$
- $H = \text{Altura o longitud del tanque}$
- $L = \text{Nivel del producto}$

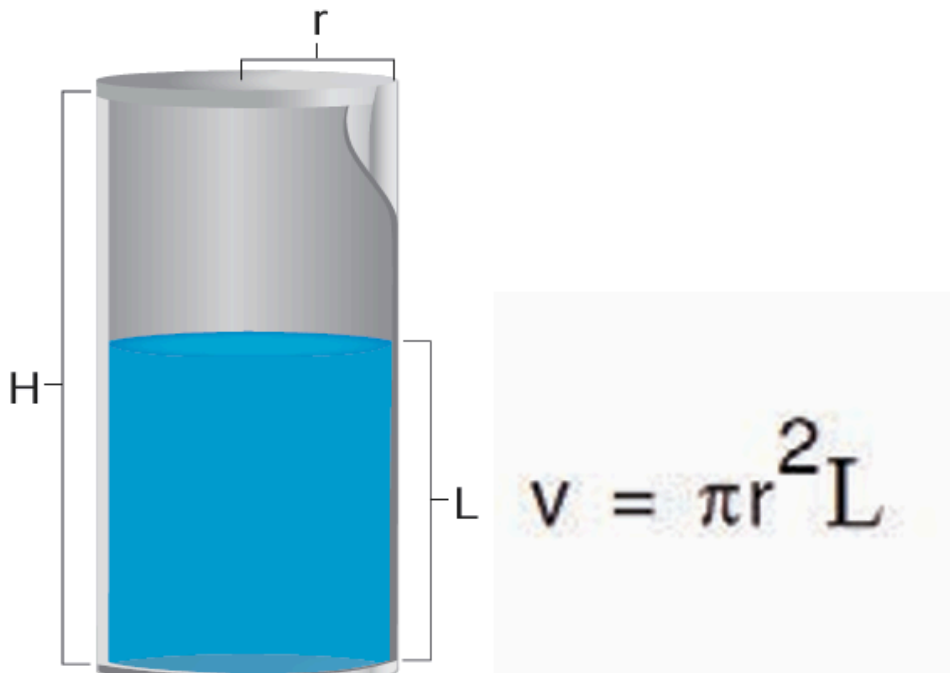


Figura 7. Calculo de volumen en un tanque

Tecnologías de Medición La clasificación de las tecnologías disponibles varía desde métodos manuales hasta dispositivos electrónicos de última generación. Estas tecnologías se agrupan en:

- Manual/Mecánica: Ej., indicadores visuales.
- Electromecánica: Ej., medidores de desplazamiento.
- Electrónica con Contacto: Ej., radar guiado por onda.
- Electrónica sin Contacto: Ej., radar no contactante.

Costos vs. Rendimiento El costo inicial de los dispositivos varía inversamente con su rendimiento. Además, los costos de mantenimiento disminuyen a medida que aumenta la sofisticación de la tecnología aplicada.

Consideraciones para la Selección de Dispositivos La selección del dispositivo de medición depende de numerosos factores, incluyendo las condiciones del recipiente, las características del producto, los requisitos de precisión y las condiciones ambientales externas.

Características del Producto El comportamiento del producto (viscosidad, densidad, presencia de espuma o sólidos suspendidos) influye en la tecnología adecuada. Por ejemplo, materiales abrasivos o corrosivos pueden requerir dispositivos sin contacto.

Requisitos de Precisión La precisión requerida depende del tamaño del tanque y de la aplicación. Para aplicaciones críticas como transferencia custodial, se necesitan dispositivos con alta estabilidad y repetibilidad.

2.6 Medición de Flujo

La medición de flujo es una disciplina clave en ingeniería y procesos industriales, utilizada para determinar la cantidad o velocidad a la que un fluido (líquido o gas) se desplaza a través de una tubería o canal. Este tipo de medición es fundamental en una amplia gama de aplicaciones, que van desde el suministro de agua potable y el procesamiento de alimentos hasta la exploración de petróleo y la investigación médica (Omega, 2017, Flow Measurement: Selection Guides and Flowmeter Products)[26]. El flujo puede ser medido utilizando diversos principios físicos y tecnológicos. En la mayoría de los casos, la medición se realiza evaluando la velocidad del fluido, que está influenciada por la presión diferencial y las características del fluido, como su densidad y viscosidad. Para obtener una medición precisa, es crucial considerar las condiciones del flujo, que pueden clasificarse como laminares o turbulentas según el número de Reynolds, un parámetro que describe el comportamiento del fluido dentro de un sistema (**Emerson**. (2021). *The Engineer's Guide to Level Measurement (2021 Edition)*. Emerson Automation Solutions.).

importancia en la Industria

La medición precisa del flujo es esencial para garantizar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de los procesos industriales. Por ejemplo:

- En la industria del agua y aguas residuales, permite cumplir con los estándares regulatorios.
- En aplicaciones médicas y farmacéuticas, asegura la dosificación correcta de líquidos y gases.

- En la producción de energía y el manejo de vapor, optimiza el uso de recursos y reduce costos operativos (Omega, 2017).

Al seleccionar un medidor de flujo, es crucial tener en cuenta las características del fluido, las condiciones de operación y los requisitos de precisión. Existen múltiples tecnologías de medición, cada una diseñada para adaptarse a aplicaciones específicas, como los medidores Coriolis para líquidos viscosos o los medidores ultrasónicos para tuberías de gran tamaño (Omega, 2017).

Medidores de Flujo

Definición: Los medidores de flujo son dispositivos utilizados para medir la tasa de flujo o la cantidad de un líquido o gas que pasa a través de una tubería. **Factores Clave:** La medición del flujo depende de la velocidad del fluido, la presión diferencial y las propiedades del fluido (densidad, viscosidad y fricción).

Parámetros Importantes:

- **Ecuación de Flujo:** $Q = V \times A$, donde Q es la tasa de flujo, V es la velocidad y A es el área de la sección transversal.
- **Número de Reynolds:** Determina el régimen de flujo (laminar, transitorio o turbulento). La mayoría de las aplicaciones industriales utilizan flujo turbulento para obtener mediciones más precisas.

Tipos de Medidores de Flujo

Entre los principales tipos de medidores de flujo, el **medidor Coriolis** es particularmente destacado por su capacidad para medir simultáneamente flujo másico, densidad y temperatura. Esta tecnología, ampliamente utilizada en la industria química, farmacéutica y alimenticia, es valorada por su alta precisión y su capacidad para manejar fluidos complejos, como líquidos viscosos o corrosivos.

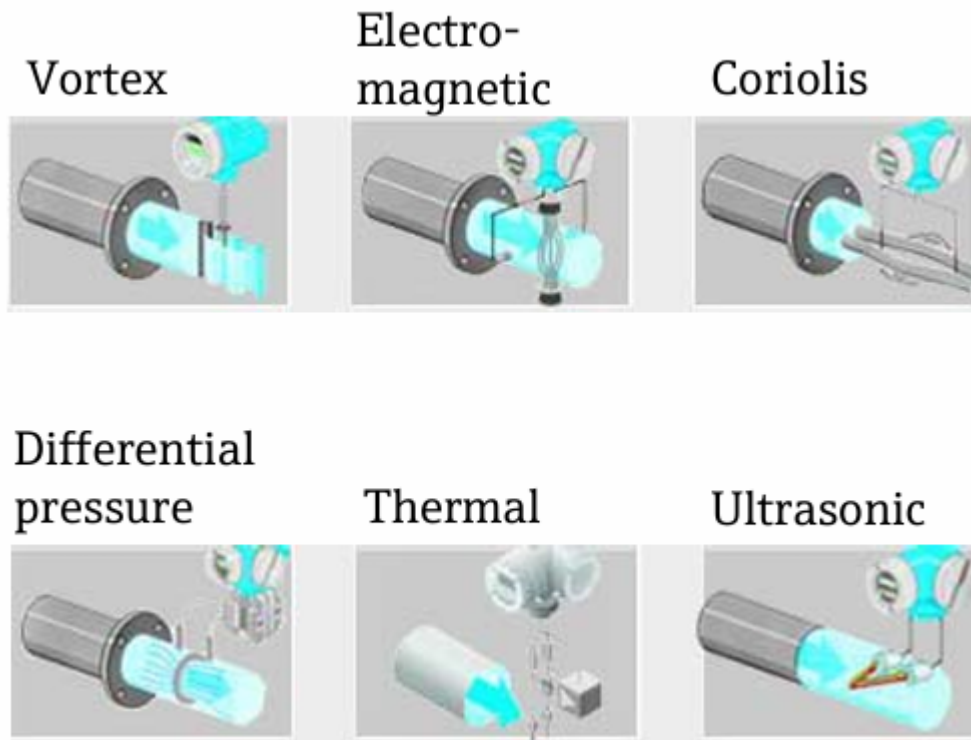


Figura 8. Principios de los Sensores de Flujo

El **medidor ultrasónico**, en cambio, opera mediante ondas ultrasónicas, lo que le permite medir el flujo sin contacto directo con el fluido. Gracias a su diseño no invasivo, este tipo de medidor es adecuado para fluidos limpios y contaminados, y es frecuentemente utilizado en el monitoreo de energía y la medición en tuberías de gran diámetro.

Por su parte, el **medidor magnético** se basa en la ley de Faraday para medir el flujo de líquidos conductivos. Su diseño sin partes móviles minimiza el mantenimiento y lo hace ideal para aplicaciones con lodos, líquidos corrosivos, agua y procesos de tratamiento de aguas residuales.

Diseñados principalmente para gases, los **medidores de masa térmica** destacan por su baja caída de presión y su independencia de las propiedades físicas del fluido, como la densidad y la viscosidad. Son comúnmente empleados en pruebas de fugas y en mediciones de flujo de baja magnitud.

Otra tecnología ampliamente utilizada es el **medidor de vórtice**, que mide el flujo al detectar la frecuencia de los vórtices generados por un obstáculo en el fluido. Estos medidores son reconocidos por su capacidad para operar en condiciones de proceso variables, y son adecuados para aplicaciones con vapor, gases y líquidos.

El **medidor de área variable**, basado en el movimiento de un flotador dentro de un tubo cónico, es una solución económica y sencilla para la medición de líquidos y gases. Su facilidad de uso lo hace ideal en sistemas de tratamiento de agua y análisis de gases.

Los **medidores de desplazamiento positivo** funcionan separando el fluido en volúmenes precisos, lo que los convierte en una opción preferida para líquidos viscosos y aplicaciones que no requieren tuberías rectas. Su uso es común en la medición de fluidos lubricantes, aceites y productos químicos.

El **medidor de turbina**, por otro lado, utiliza un rotor giratorio para medir la velocidad del flujo con alta precisión. Su aplicación se extiende a líquidos de baja viscosidad, siendo frecuentemente empleado en campos petroleros y sistemas de agua.

Finalmente, los **medidores de rueda de paletas** son una solución económica para sistemas de flujo en aplicaciones de refrigeración y HVAC. Utilizan una rueda con paletas en contacto directo con el fluido para medir el flujo de manera efectiva y a bajo costo.

Cada uno de estos medidores está diseñado para abordar necesidades específicas, ofreciendo soluciones personalizadas para diferentes fluidos, rangos de flujo y condiciones operativas. Esta diversidad tecnológica permite su implementación en una amplia gama de sectores industriales, asegurando mediciones precisas y eficientes.

Consideraciones para la Selección Antes de elegir un medidor de flujo, es importante evaluar los siguientes aspectos de :

- Tipo de fluido (limpio, sucio, viscoso, corrosivo).
- Rango de presión, temperatura y caudal.
- Compatibilidad química con los materiales del medidor.
- Requisitos de salida de señal (analógica, digital, etc.).
- Restricciones de instalación (longitud de tuberías rectas, tamaño de tuberías).

Afortunadamente el equipo de omega ha generado una tabla que nos permite visualizar las ventajas y las aplicaciones de estos instrumentos de una sencilla lo cual facilita la elección de estos sensores con base a su principio de funcionamiento y a los requerimientos de la operacion, muchos fabricantes tienen tablas parecida a las figura 8, pero algunos de estos no cuentan con soluciones de medida de flujo por turbina.



	Coriolis	Ultrasonic	Magnetic	Thermal Mass	Vortex	Variable Area	Positive Displacement	Turbine	Paddle Wheel
	Page 7	Page 8	Page 11	Page 15	Page 20	Page 22	Page 25	Page 28	Page 32
Liquid/ Application									
Clean	yes	yes	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
Dirty	yes	yes	yes	no	yes	yes	no	no	limited
Conductive	yes	yes	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
Viscous	yes	yes	yes	no	no	limited	yes	limited	no
Slurries	yes	yes (Doppler)	yes	no	no	no	no	no	no
Corrosive	yes	yes	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
Reverse flow	no	yes	yes	no	no	no	yes	no	no
Pulsating flow	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Semi filled pipes	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Open channel	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Gases/ Application	Coriolis	Ultrasonic	Magnetic	Thermal Mass	Vortex	Variable Area	Positive Displacement	Turbine	Paddle Wheel
Steam	no	no	no	no	yes	yes	no	yes	no
Clean	yes	no	no	yes	yes	yes	no	yes	no
Wet	no	no	no	no	no	yes	no	no	no
Contaminated	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Corrosive	no	no	no	yes	yes	yes	no	yes	no

Figura 8. Tipos de Sensores de Flujo y su Aplicación

2.7 Normativas y Estándares

El cumplimiento de normativas y estándares es esencial en el diseño, implementación y operación de sistemas de monitoreo para plantas purificadoras de agua. Estas regulaciones aseguran que los equipos y procesos utilizados cumplan con criterios técnicos, legales y sanitarios, promoviendo la sostenibilidad y la seguridad. Este capítulo aborda tres categorías principales de normativas aplicables a los sistemas de medición de flujo y nivel en plantas purificadoras: las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), los estándares internacionales ISO y las guías de la American Water Works Association (AWWA).

2.7.1 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

En México, las plantas purificadoras de agua deben cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son obligatorias para garantizar la calidad del agua y el funcionamiento adecuado de los sistemas de monitoreo. Estas normas son establecidas y supervisadas por la Secretaría de Salud (SSA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

La **NOM-005-CONAGUA-1996** regula los medidores y dispositivos de control en sistemas de distribución de agua. Establece requisitos mínimos de precisión, especificando que los dispositivos deben garantizar al menos un 95% de confiabilidad. Esto incluye el uso de equipos calibrados periódicamente y el registro en tiempo real de las mediciones de flujo y nivel. La norma busca optimizar la gestión de los recursos hídricos en instalaciones públicas y privadas, garantizando que el agua tratada llegue a los consumidores con la calidad y cantidad esperadas.

Por otra parte, la **NOM-127-SSA1-2021** regula la calidad del agua para uso y consumo humano. Aunque se enfoca en parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, también establece lineamientos para la trazabilidad y monitoreo de las condiciones del agua durante su almacenamiento y distribución. Esta norma asegura que las plantas purificadoras implementen medidas que minimicen riesgos a la salud pública y que cumplan con los estándares internacionales de calidad [Agua Inmaculada, 2024][38].

2.7.2 Estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO)

Los estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO) son ampliamente utilizados para garantizar la uniformidad y precisión en la medición de flujo y nivel en sistemas industriales. Estos estándares son reconocidos internacionalmente y proporcionan directrices específicas para la selección, instalación y operación de dispositivos de medición.

La **ISO 4064** regula los medidores de agua en sistemas cerrados, estableciendo tolerancias de error, métodos de calibración y procedimientos de prueba. Esta norma asegura que los dispositivos utilizados para la medición de flujo cumplan con altos estándares de precisión y durabilidad, especialmente en aplicaciones de monitoreo continuo y transferencia custodiada.

La **ISO 5167** establece los lineamientos para dispositivos de medición de flujo basados en presión diferencial, como los medidores de orificio, venturi y toberas. Este estándar es especialmente relevante para sistemas que requieren alta precisión en la medición de flujo, ya

que garantiza una operación confiable incluso en condiciones extremas de temperatura y presión.

Estas normas son esenciales para plantas purificadoras de agua que buscan implementar tecnologías avanzadas de medición, asegurando la interoperabilidad de equipos y el cumplimiento de estándares globales (ISO, 2014)[39].

2.7.3 Lineamientos de la American Water Works Association (AWWA)

La American Water Works Association (AWWA) es una organización líder en la gestión del agua, conocida por establecer estándares técnicos rigurosos para sistemas de monitoreo y distribución de agua potable.

El **Manual M33: Flowmeters in Water Supply** ofrece especificaciones detalladas sobre la selección y operación de medidores de flujo, incluyendo tecnologías ultrasónicas, magnéticas y de turbina. Este documento es un recurso clave para diseñar sistemas de monitoreo que cumplan con las exigencias de precisión y sostenibilidad en la industria del agua.

El **Manual M36: Water Audits and Loss Control** enfatiza la importancia del monitoreo continuo en sistemas de distribución, destacando cómo los sistemas de monitoreo pueden minimizar las pérdidas de agua, detectar fugas y mejorar la eficiencia operativa. Además, este manual subraya la necesidad de seleccionar medidores adecuados para aplicaciones específicas, optimizando tanto los costos como la funcionalidad del sistema.

La **AWWA Standard C704-21** regula los medidores ultrasónicos utilizados en aplicaciones de suministro de agua, estableciendo lineamientos para su diseño, instalación y mantenimiento. Este estándar garantiza que los medidores ultrasónicos sean confiables en la medición de caudales bajos y altos, ofreciendo soluciones efectivas para el monitoreo en tiempo real en plantas purificadoras de agua (AWWA, 2021) (AWWA, 2021b)[40].

3. Modulo de Hardware

3.1 Análisis

El diseño del sistema de monitoreo comenzó con un análisis detallado de las necesidades técnicas, operativas y económicas. En este apartado, se justifica la selección de los componentes y tecnologías utilizados.

Selección del Microcontrolador ESP32

El **ESP32**, desarrollado por Espressif Systems, fue seleccionado como el microcontrolador principal del sistema debido a su versatilidad, capacidad de procesamiento y conectividad integrada. Algunas de las características clave que justificaron su elección incluyen:

1. **Relación Costo-Beneficio:**
 - En comparación con microcontroladores como el ARM Cortex-M o AVR, el ESP32 ofrece un rendimiento superior a un costo accesible. Esto lo hace ideal para proyectos de prototipado que requieren alta capacidad de procesamiento pero operan con presupuestos limitados (Espressif Systems, 2023)[31].
2. **Conectividad Integrada:**
 - El ESP32 incluye Wi-Fi y Bluetooth en su arquitectura, eliminando la necesidad de módulos adicionales para establecer comunicación inalámbrica. Esto reduce tanto el costo total del sistema como la complejidad del diseño.
3. **Capacidad de Procesamiento:**
 - Su arquitectura de doble núcleo y frecuencia de operación de hasta 240 MHz garantiza un procesamiento eficiente de las señales provenientes de múltiples sensores. Esta capacidad es crucial para sistemas que requieren adquirir, procesar y transmitir datos en tiempo real.
4. **Compatibilidad con SDK de Arduino:**
 - El ESP32 es compatible con el entorno de desarrollo Arduino, lo que facilita la programación y la integración de bibliotecas para manejar sensores y conexiones de red.

Uso de Arduino como SDK

Arduino fue elegido como entorno de desarrollo debido a su accesibilidad y la extensa comunidad que respalda su uso. Algunas razones específicas para esta decisión incluyen:

1. **Facilidad de Uso:**
 - Arduino simplifica el proceso de desarrollo mediante un entorno de programación amigable y bibliotecas preconfiguradas para manejar hardware específico, como sensores de flujo y nivel.
2. **Open Source:**
 - Al ser una plataforma de código abierto, Arduino permite modificar y personalizar las bibliotecas y el firmware según las necesidades específicas del sistema.
3. **Documentación Extensa:**

- La gran cantidad de documentación, foros y recursos en línea permite a los desarrolladores resolver problemas de manera rápida y eficiente, reduciendo el tiempo de desarrollo del proyecto (Arduino, 2023).

Análisis del Sensor de Flujo YFS201

El sensor YFS201 fue seleccionado para medir el flujo de agua debido a su bajo costo y facilidad de integración con microcontroladores como el ESP32. Entre sus características destacadas están:

- 1. Rango de Operación:**
 - El sensor puede medir caudales de hasta 30 litros por minuto, lo cual es adecuado para la capacidad operativa de la planta purificadora.
- 2. Funcionamiento:**
 - El sensor genera pulsos eléctricos proporcionales a la velocidad del flujo de agua. Estos pulsos son procesados por el ESP32 para calcular el caudal en litros por minuto y el total consumido en litros.
- 3. Limitaciones:**
 - Aunque el YFS201 no cumple con ciertas normativas sanitarias debido a su material de construcción, su bajo costo lo hace viable para prototipos y pruebas iniciales. En futuras implementaciones, se deberá considerar un sensor que cumpla con las regulaciones sanitarias aplicables (Omega, 2017).

Análisis del Sensor de Nivel HCSR04

El sensor ultrasónico HCSR04 fue elegido para medir el nivel de agua en los tanques debido a su precisión y bajo costo. Este sensor funciona enviando pulsos ultrasónicos que rebotan en la superficie del agua, calculando la distancia con base en el tiempo que tarda el eco en regresar al sensor.

- 1. Rango de Medición:**
 - El HCSR04 puede medir distancias desde 2 cm hasta 400 cm con una precisión de ± 0.3 cm. Esto lo hace adecuado para medir los niveles de agua en el tanque, cuya capacidad máxima es de 4800 litros y mínima de 400 litros.
- 2. Conversión de Distancia a Volumen:**
 - La distancia medida por el sensor es transformada en volumen en litros considerando la geometría cilíndrica del tanque. Este cálculo se realiza utilizando la ecuación estándar de volumen para cilindros:
- 3. $V = \pi r^2 h$**
donde r es el radio del tanque y h es la altura del agua medida por el sensor.
- 4. Ventajas:**
 - Este sensor no requiere contacto físico con el agua, lo que elimina problemas relacionados con corrosión o contaminación. Además, su facilidad de integración con el ESP32 permite una configuración rápida y eficiente.

Geometría del Tanque

El tanque utilizado en la planta purificadora tiene una forma cilíndrica con las siguientes características:

- **Capacidad Máxima:** 4800 litros.
- **Capacidad Mínima:** 400 litros.
- **Altura Total:** 2.07 metros.

Estas especificaciones fueron fundamentales para definir los rangos de operación del sensor HCSR04, así como para calcular la transformación de distancia a volumen.

Variables Monitoreadas

El sistema se diseñó para medir las siguientes variables clave:

1. **Nivel de Agua:**
Expresado en litros y calculado a partir de la distancia medida por el HCSR04.
2. **Distancia al Agua:**
Medida en centímetros directamente por el HCSR04.
3. **Flujo de Agua:**
Medido en litros por minuto utilizando el sensor YFS201.
4. **Consumo Total:**
Calculado acumulando los valores de flujo medidos por el sensor YFS201.

Este conjunto de variables proporciona información crítica para la operación eficiente de la planta y permite detectar anomalías en el proceso.

3.2 Métodos y Materiales

- **Métodos**
 - **Medición de Nivel:** Se implementó un método basado en medición de distancia utilizando el sensor ultrasónico HCSR04, cuyas lecturas fueron transformadas en volumen en litros considerando la geometría del tanque cilíndrico.
 - **Medición de Flujo:** Se utilizó el sensor YFS201, que convierte el flujo de agua en pulsos eléctricos, los cuales son procesados para obtener el caudal en litros por minuto y el total acumulado.
 - **Conexión a Base de Datos:** Se desarrolló un conector para bases de datos MySQL utilizando el ESP32. La información recopilada es enviada directamente a una base de datos gestionada en SingleStore para su análisis y almacenamiento.
- **Materiales**
 - Microcontrolador ESP32.
 - Sensor ultrasónico HCSR04.
 - Sensor de flujo YFS201.
 - Placa PCB diseñada en KiCad.
 - Caja de protección diseñada en Fusion360.
 - Software de desarrollo: Arduino IDE, KiCad, Fusion360, MySQL.

3.3 Diseño

- **Diseño de la PCB:**

Se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) utilizando **KiCad**, que integra el microcontrolador ESP32, los sensores y los circuitos de acondicionamiento necesarios. El diseño incluyó reguladores de voltaje, resistencias y capacitores para estabilizar las señales provenientes de los sensores y garantizar lecturas precisas. Además, se añadieron pistas adecuadamente dimensionadas para minimizar interferencias electromagnéticas y asegurar la integridad de las señales.

La PCB fue diseñada con conectores dedicados para cada sensor y módulos de comunicación, facilitando la instalación y mantenimiento del sistema. Las conexiones eléctricas y las disposiciones de los componentes fueron optimizadas para reducir el ruido y las interferencias externas, garantizando un funcionamiento confiable en entornos industriales.

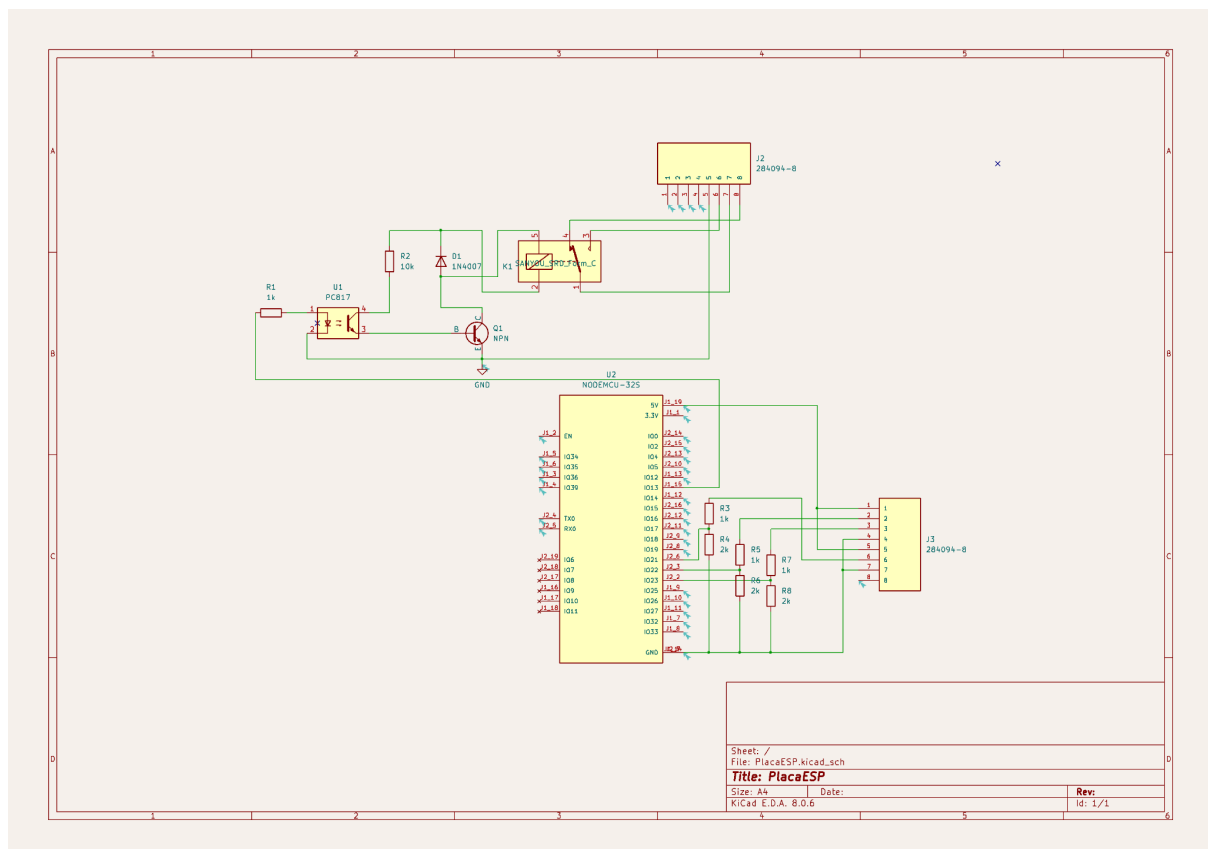


Figura 9. Diseño Esquemático

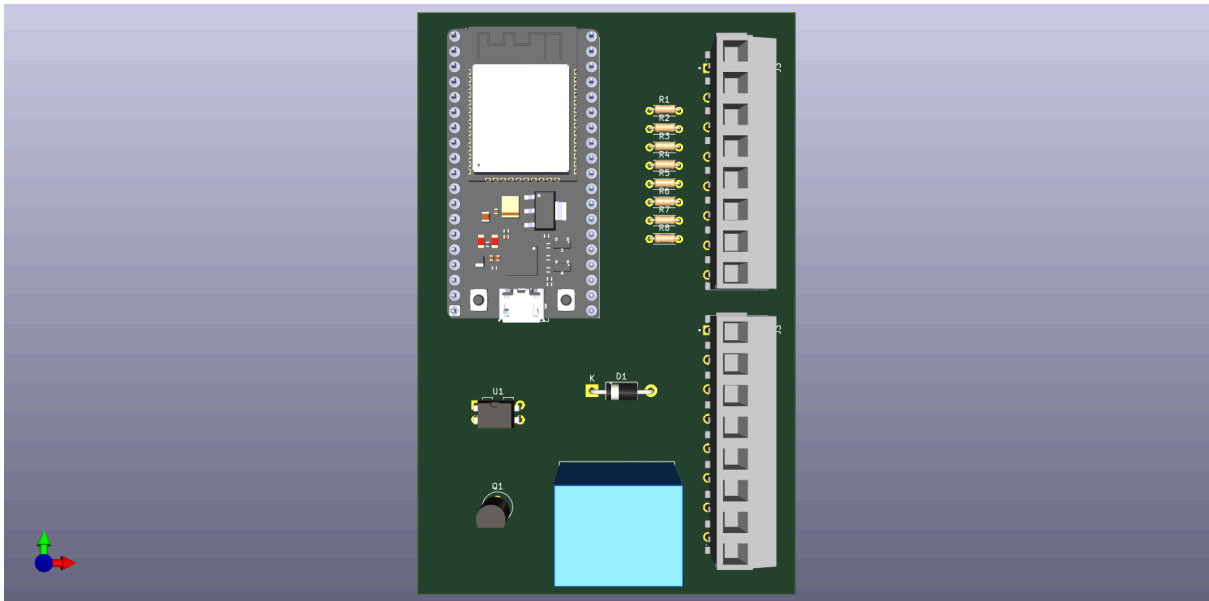


Figura 10. Placa PCB

- **Diseño de la Caja Protectora:**

Para proteger la PCB y los sensores, se diseñó una caja protectora en **Fusion360** siguiendo los estándares de diseño industrial y normativas aplicables a sistemas de monitoreo en plantas de agua. La caja fue fabricada con plástico resistente a la intemperie y la radiación UV, lo que garantiza la durabilidad del sistema en condiciones adversas. Se incluyeron ventilas y sellos de goma para evitar la acumulación de humedad y polvo dentro del recinto, respetando los grados de protección IP correspondientes.

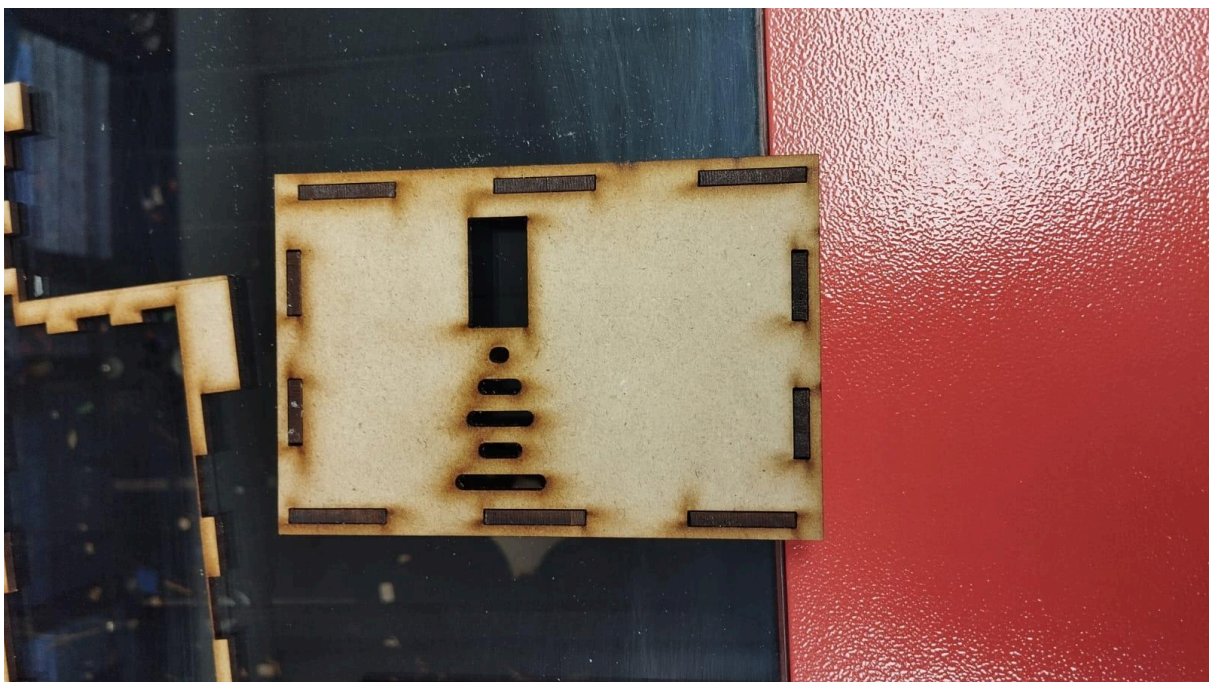


Figura 11. Placa PCB

- **Conexión y Visualización de Datos:**

La integración del sistema con **MySQL** fue posible gracias al uso de **MySQL Connector**, una biblioteca que permite al ESP32 enviar datos directamente a la base de datos. Los comandos SQL fueron configurados para almacenar lecturas en tiempo real en tablas específicas, cada una representando una variable medida (nivel, flujo, volumen acumulado, etc.). La base de datos, alojada en **SingleStore**, se diseñó para permitir consultas rápidas y almacenamiento escalable, lo que facilita el análisis posterior de los datos recolectados.

El diseño del sistema consideró la sincronización de los datos enviados por el ESP32, asegurando que las mediciones de nivel y flujo se almacenen con marcas de tiempo precisas. Esto permite una visualización clara y en tiempo real de las operaciones de la planta, optimizando la capacidad de los operadores para tomar decisiones basadas en datos confiables y actualizados.

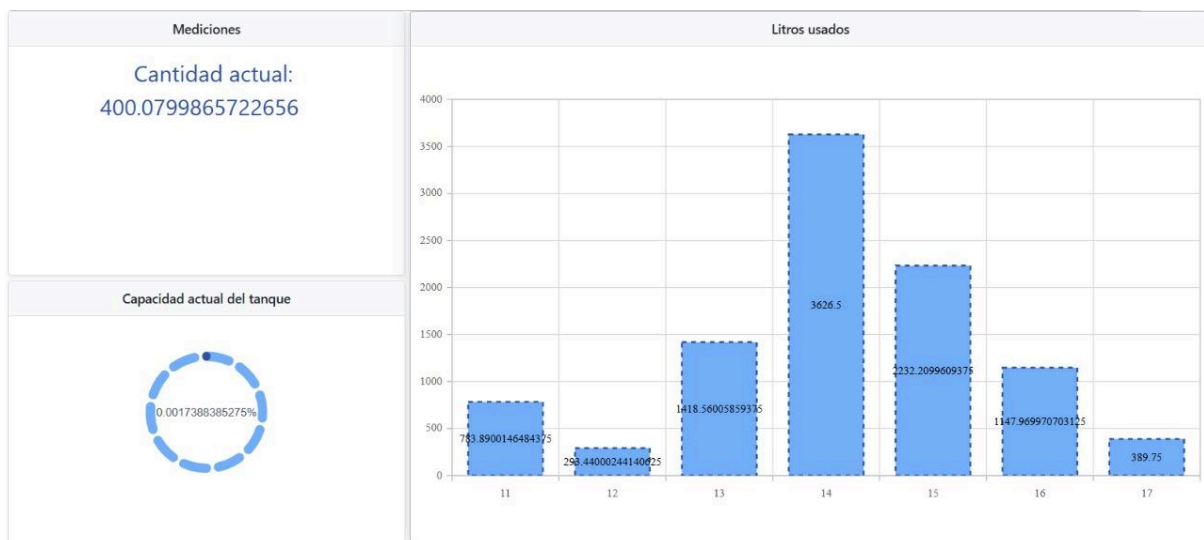


Figura 11. Dashboard con Mediciones del Sistema

3.4 Implementación del modulo de Hardware

- **Integración de Componentes**
 - Los sensores HCSR04 y YFS201 se conectaron a la PCB diseñada, junto con el microcontrolador ESP32. Se implementaron circuitos de acondicionamiento para garantizar señales precisas y compatibles con el rango de entrada del microcontrolador.
- **Calibración de Sensores**
 - El sensor HCSR04 fue calibrado para transformar las lecturas de distancia en volumen de agua, considerando la geometría del tanque. El sensor YFS201 fue configurado para generar pulsos proporcionales al flujo de agua (esto se vera mas a detalle en el capitulo de pruebas).
- **Envío de Datos**
 - Se estableció una conexión directa entre el ESP32 y la base de datos MySQL mediante Wi-Fi. Los datos recopilados por los sensores se envían en tiempo real, permitiendo su almacenamiento y análisis.

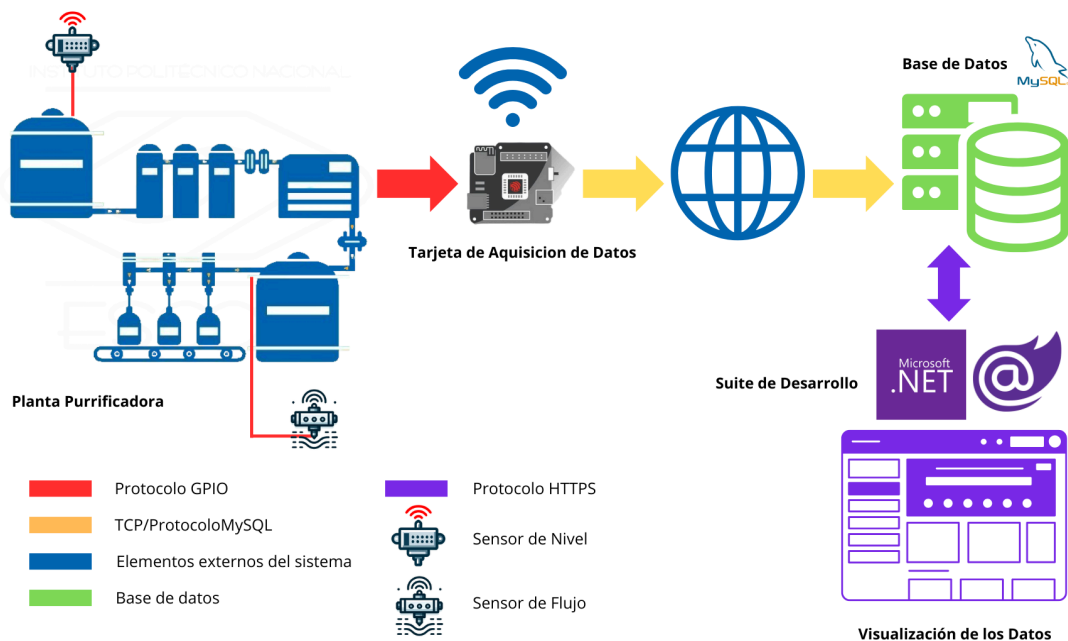


Figura 12. Diagrama de Arquitectura

4. Modulo de Software

4.1 Análisis

El desarrollo del módulo de software del sistema de monitoreo para la Planta Purificadora de Agua del IPN implicó la implementación de herramientas modernas y eficientes para garantizar una arquitectura robusta y escalable. Este módulo tiene como función principal interpretar, almacenar y visualizar los datos recopilados por el hardware del sistema, asegurando que los usuarios puedan supervisar y analizar las variables críticas de la operación en tiempo real.

Para el backend, se optó por utilizar una base de datos MySQL alojada en el servicio de almacenamiento distribuido **SingleStore**. La elección de MySQL se basó en su amplia adopción, facilidad de uso y compatibilidad con herramientas y bibliotecas de código abierto. SingleStore, por su parte, ofrece una solución escalable y de alto rendimiento para manejar los datos generados por el sistema. Este servicio es especialmente útil para aplicaciones en tiempo real, ya que permite consultas rápidas y eficientes incluso con grandes volúmenes de datos, lo cual es esencial para el monitoreo continuo de la planta (SingleStore, 2023)[34].

La conexión entre el hardware y la base de datos se realizó mediante el uso del conector **MySQL Connector**. Este componente permite que el microcontrolador ESP32 se comunique directamente con la base de datos a través de una red Wi-Fi, enviando datos como el nivel de agua en litros, el flujo en litros por minuto y el total consumido. La elección del conector MySQL fue motivada por su simplicidad de configuración y su soporte nativo para entornos embebidos y aplicaciones IoT. Esta integración asegura que los datos recopilados por los sensores sean almacenados de manera confiable y estén disponibles para su análisis en tiempo real (MySQL, 2023)[35].

En el desarrollo del frontend, se utilizó **.NET Blazor**, un framework moderno de Microsoft que permite crear aplicaciones web interactivas utilizando C#. La elección de Blazor se fundamentó en su capacidad para unificar el desarrollo del cliente y el servidor, reduciendo la complejidad del proyecto y mejorando la reutilización del código. Además, Blazor se integra fácilmente con bibliotecas como **Syncfusion**, que proporciona controles avanzados para crear dashboards interactivos y visualizaciones de datos. Syncfusion facilita la implementación de gráficos, tablas y elementos visuales que permiten al usuario interpretar de manera intuitiva las métricas críticas de la planta, como niveles de agua, flujos y consumos totales (Microsoft, 2023; Syncfusion, 2023)[36].

El análisis del diseño del módulo de software también consideró la necesidad de adaptarse a diferentes perfiles de usuario, desde operadores de planta hasta administradores. Por ello, se implementaron herramientas de personalización dentro del dashboard, permitiendo a cada usuario ajustar las métricas y visualizaciones mostradas según sus necesidades específicas. Este enfoque no solo mejora la experiencia del usuario, sino que también optimiza la toma de decisiones al presentar la información más relevante para cada rol.

4.2 Métodos y Materiales

El módulo de software se desarrolló utilizando las siguientes herramientas y tecnologías:

- **Base de Datos:** MySQL alojada en SingleStore para garantizar un almacenamiento rápido y confiable.
- **Conector:** MySQL Connector para permitir la comunicación entre el ESP32 y la base de datos.
- **Framework Backend:** .NET Core para la lógica de servidor.
- **Framework Frontend:** Blazor para el desarrollo de la interfaz gráfica.
- **Componentes Visuales:** Bibliotecas de Syncfusion para gráficos y visualizaciones interactivas.
- **Servidor:** SingleStore para procesamiento en tiempo real y consultas optimizadas.

El diseño de la arquitectura incluyó una conexión directa entre la ESP32 y la base de datos para simplificar la comunicación. La ESP32 envía datos a intervalos regulares, que son almacenados en tablas estructuradas dentro de la base de datos MySQL.

4.3 Diseño

El diseño del módulo de software se enfocó en garantizar la escalabilidad y la modularidad. Se estructuraron tres capas principales:

1. **Capa de Datos:** Gestionada por MySQL en SingleStore, esta capa almacena toda la información recopilada por los sensores. Las tablas incluyen campos específicos para las variables medidas, como nivel de agua, flujo y consumo total.
2. **Capa de Lógica:** Implementada con .NET Core, esta capa es responsable de procesar y gestionar los datos almacenados en la base de datos. También incluye servicios para la autenticación de usuarios y el envío de alertas en caso de anomalías.
3. **Capa de Presentación:** Construida con Blazor y Syncfusion, esta capa proporciona la interfaz gráfica de usuario. Incluye dashboards interactivos que muestran gráficos, tablas y alertas en tiempo real, permitiendo a los usuarios monitorear las variables críticas del sistema.

El diseño del dashboard incluye una vista principal que resume las métricas clave de la planta, con opciones para profundizar en detalles específicos, como tendencias históricas o análisis comparativos.

Casos de uso

El diagrama muestra el actor utilizando todas las capacidades del portal de visualización, para poder acceder a los tableros se tiene que autenticar una con usuario y contraseña. Una vez identificado, tiene la opción de visualizar alguno de los tableros individuales y poder cerrar la sesión, en la siguiente figura ilustramos los casos de uso

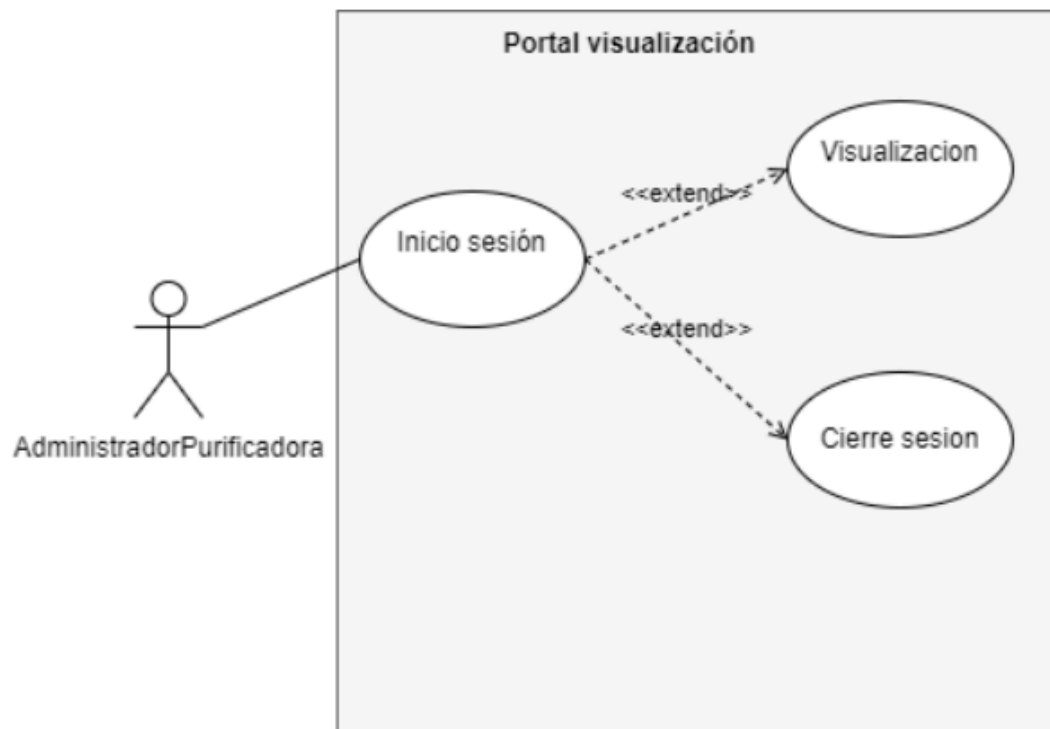


Figura 13. Casos de Uso

Diagramas de secuencia

El siguiente diagrama muestra como el sensor interactúa con los elementos del sistema para almacenar la información

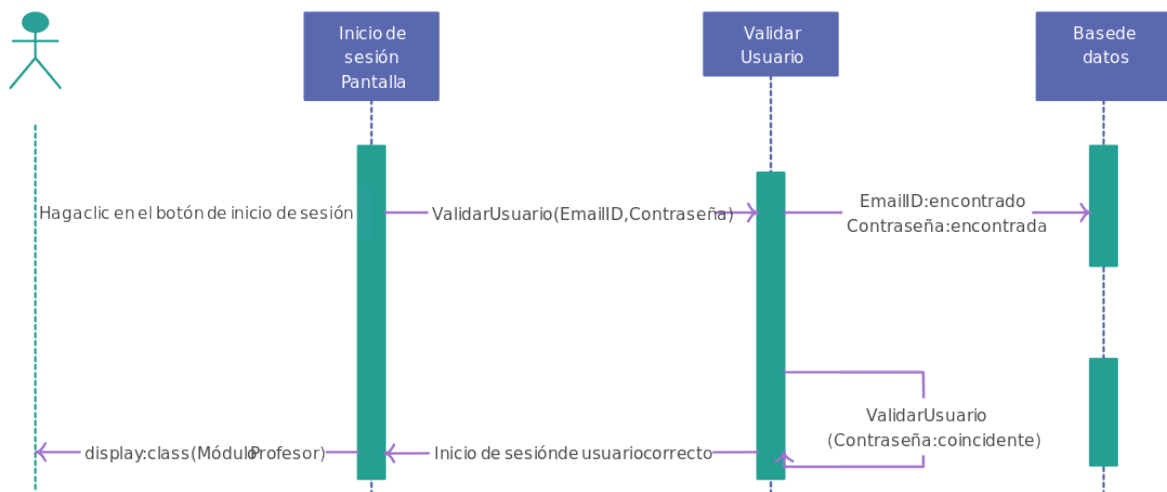


Figura 14. Diagrama de Secuencia

Diagrama Entidad Relación

Se usará una base de datos MySQL por lo que esta será relacional como se muestra en el siguiente diagrama, a continuación, se presenta el diagrama Entidad-Relación:

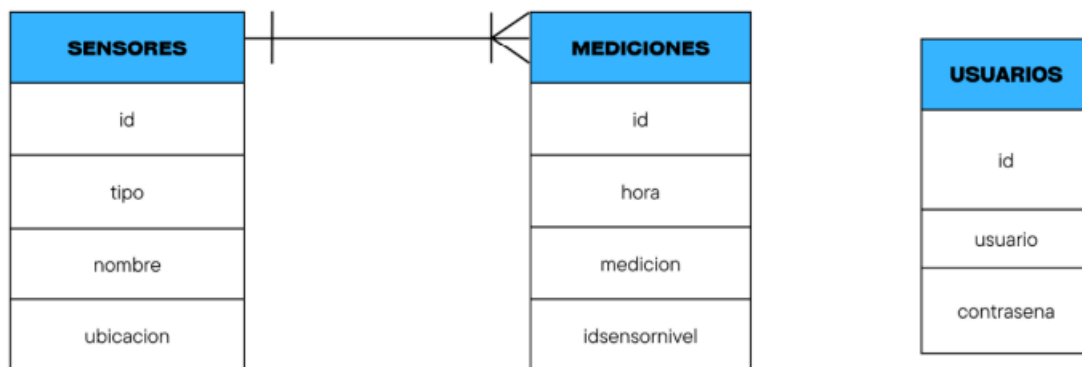


Figura 15. Diagrama Entidad Relación

4.4 Implementación del Módulo de Software

La implementación del módulo de software comenzó configurando la base de datos en SingleStore. Las tablas se diseñaron para manejar eficientemente los datos provenientes del ESP32, utilizando índices para optimizar las consultas en tiempo real. El conector MySQL se integró en el firmware del ESP32, lo que permitió la transmisión continua de datos desde el hardware hacia la base de datos.

En el servidor, se implementaron servicios RESTful en .NET Core para gestionar las consultas y proporcionar una interfaz estandarizada entre la base de datos y el frontend. Estos servicios también manejan tareas como la autenticación de usuarios y la generación de reportes.

Finalmente, el frontend se desarrolló utilizando Blazor y Syncfusion. Las bibliotecas de Syncfusion permitieron crear visualizaciones avanzadas, como gráficos de barras y líneas, para representar tendencias en el nivel de agua y el flujo en tiempo real. Además, se añadieron notificaciones visuales y sonoras para alertar a los usuarios sobre anomalías en las variables medidas.

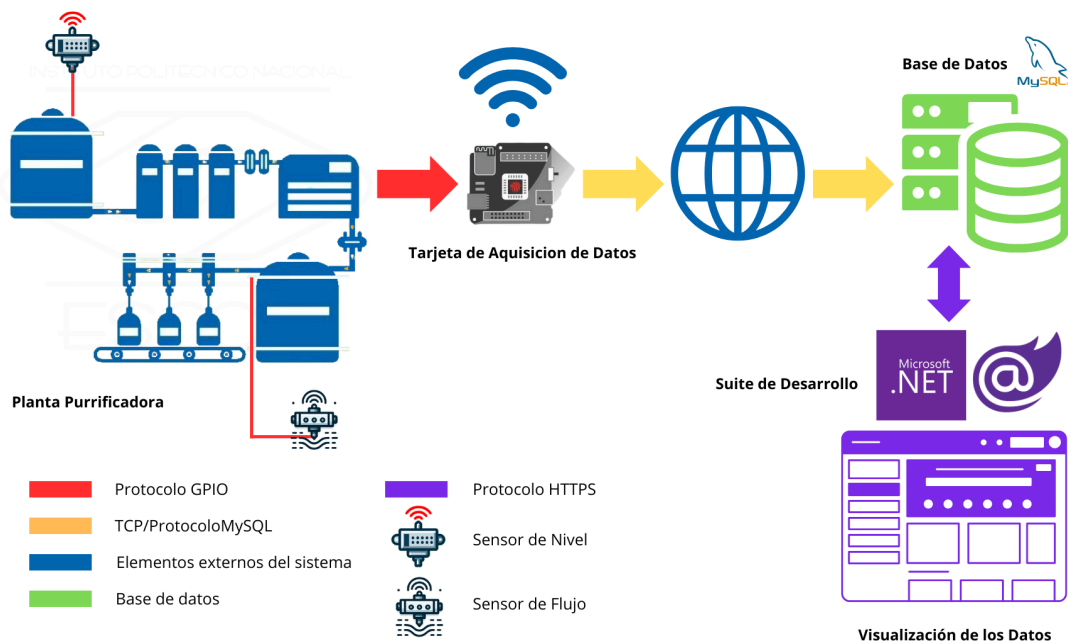


Figura 16. Diagrama de Arquitectura

5. Pruebas

Índice para llenar apartado de pruebas

El nivel de agua en los tanques de la planta se ha medido tradicionalmente de forma manual y, actualmente, se complementa con un sistema de sensores para obtener datos más precisos y en tiempo real.

Inicialmente, se utilizaban niveles de referencia en los tanques, cada uno representando un volumen específico de agua. Un operario visualizaba el nivel y lo anotaba en una bitácora. Para mayor precisión, se realizaron cálculos para agregar marcas adicionales.

El tanque contaba con niveles de referencia preestablecidos cada 400 litros. El personal de la planta medía la distancia entre cada marca y realizaba cálculos para determinar una nueva marca cada 50 litros. De esta manera, se podía estimar visualmente el volumen de agua en el tanque.

Actualmente se emplea un sensor de volumen para medir de forma automática el nivel de agua en el tanque. Se aprovechó la forma cilíndrica del tanque y se utilizó una fórmula matemática para calcular el volumen a partir de la altura del agua. Gracias a este sistema, se obtienen datos numéricos exactos y en tiempo real, lo que permite un monitoreo continuo.

Las pruebas consistieron en utilizar los niveles de referencia del fabricante para dejar un valor de comparación de la planta contra las mediciones del sensor en un horario específico.

Se sacaron fotos del tanque en las horas cuando el agua estaba cerca del nivel de referencia en las que sabemos cuántos litros de agua hay.

Nuestro sensor estuvo realizando de 4 a 5 lecturas por minuto, lo que nos dio un margen de medición para generar los cálculos necesarios.

Para realizar el ejercicio se tomó como referencia una imagen del tanque en los niveles de referencia del fabricante cada 400 litros, empezando desde 4800 hasta 400, y sobre la hora de la foto se hicieron las consultas para obtener todas las lecturas en ese minuto, después, se hizo el promedio de las mediciones y se agregaron en la siguiente tabla.

Ejemplo:

La siguiente foto se tomó el 19 de diciembre del 2024 a las 14:31 horas, la marca más cercana del fabricante a la marca de 4000.

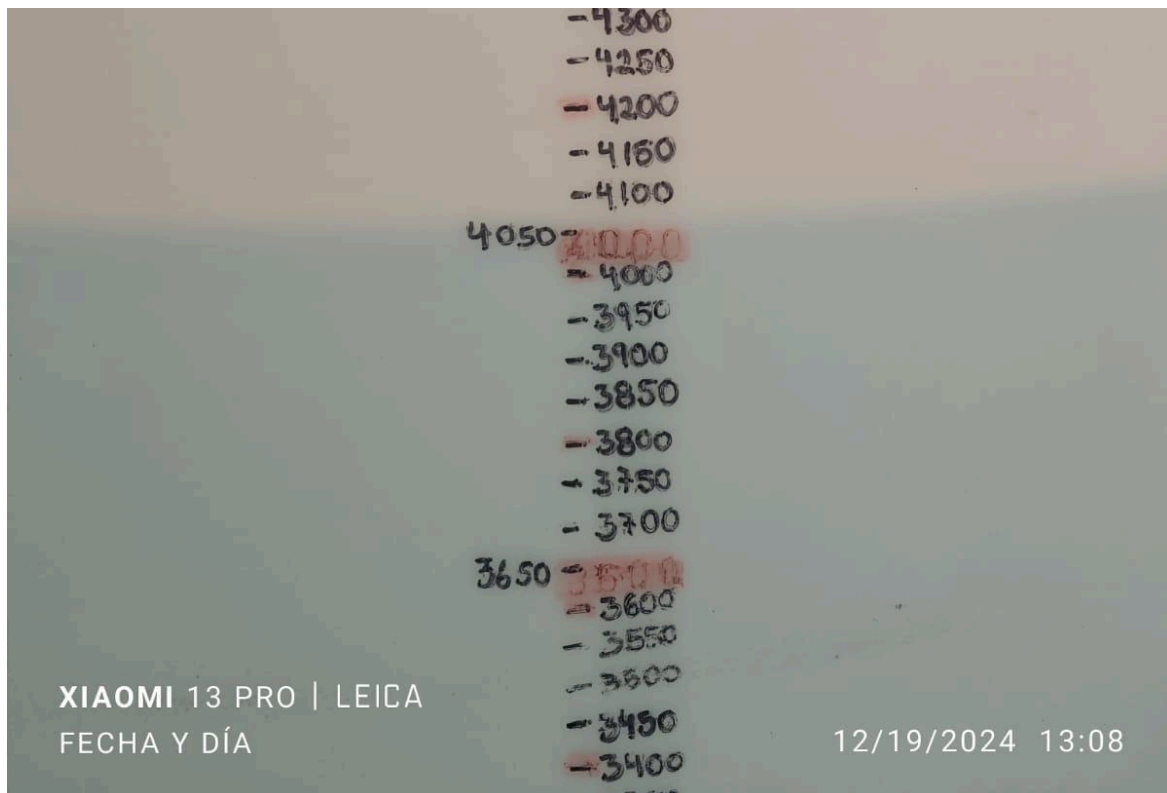


Figura 17. Nivel en los Tanques

Dentro de la base de datos realizamos las siguientes consultas para obtener todas las mediciones en ese minuto. En este caso la cantidad de mediciones en ese minuto son de 4.

```

25 SELECT m.id,
26         m.fecha_mexico,
27         m.hora_mexico,
28         m.valor,
29         m.sensor
30 FROM med_mex m
31 WHERE m.sensor = 'NIVEL'
32 AND DATE(m.fecha_mexico) = DATE('2024-12-19')
33 AND DATE_TRUNC('minute', m.fecha_mexico) = DATE_TRUNC('minute', '2024-12-19 13:08:00')
34 ORDER BY m.fecha_mexico DESC;
35

```

Message Logs

SELECT m.id, ... x SELECT m.id, ... x SELECT m.id, ... x

Save as CSV Save to Stage Copy to Clipboard

id	fecha_mexico	hora_mexico	valor	sensor
1125899906846271	2024-12-19 13:08:49	13	4054	NIVEL
1125899906846268	2024-12-19 13:08:36	13	4054.47	NIVEL
2251799813688616	2024-12-19 13:08:23	13	4053.53	NIVEL
2251799813688613	2024-12-19 13:08:10	13	4060.1	NIVEL

Figura 18. Mediciones en la Base de Datos

Después realizamos una consulta diferente para obtener el promedio y se fue anotando en la siguiente tabla después de cada ejercicio.

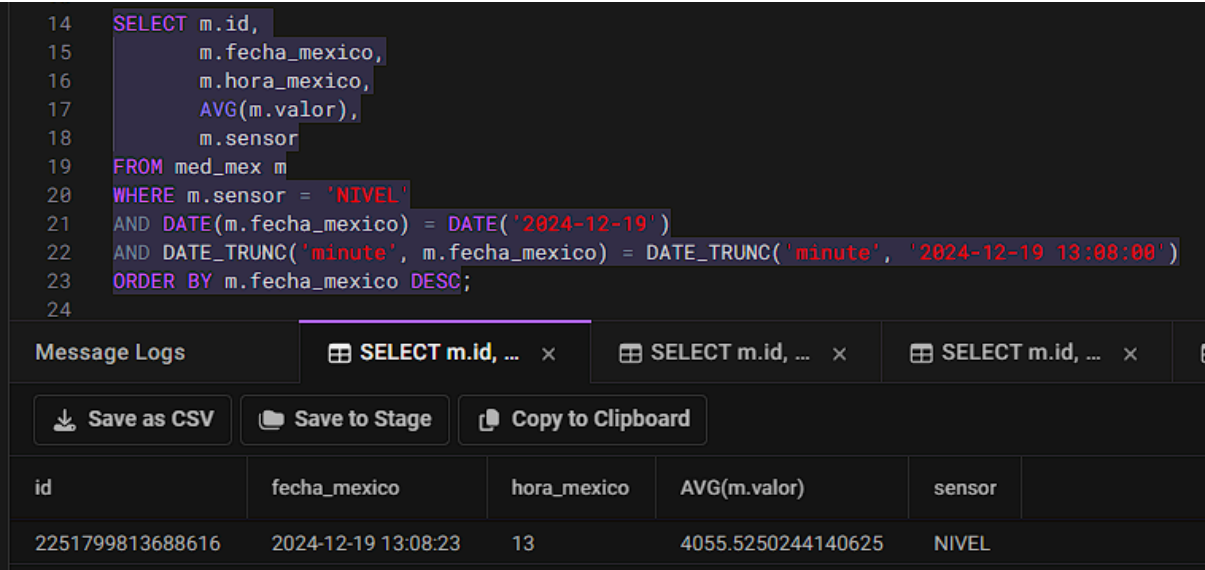


Figura 19. Promedio de las Mediciones

Hora	Nivel de referencia (L)	Lectura sensor (L)	Error Absoluto	Error Relativo
12:32:00	4800	4,792.95483398437	7.04516601563	0.1
12:46:00	4400	4,447.31750488281	47.31750488281	1.1
13:08:00	4000	4,055.52502441406	55.52502441406	1.4
15:03:00	3600	3,605.45795898437	5.45795898437	0.2
15:19:00	3200	3,217.44750976562	17.44750976562	0.5
15:34:00	2800	2,855.31801757812	55.31801757812	2.0
15:52:00	2400	2,434.68198242187	34.68198242187	1.4
16:11:00	2000	1,994.59597167968	5.40402832032	0.3
16:26:00	1600	1,634.36997070312	34.36997070312	2.1
16:43:00	1200	1,312.67199707031	112.67199707031	9.4
17:08:00	800	914.39599609375	114.39599609375	14.3
17:34:00	400	473.83750152588	73.83750152588	18.5

Para evaluar la precisión del sensor, calculamos el error absoluto entre las lecturas del sensor y los valores de referencia del fabricante. Este error representa la diferencia numérica entre ambos valores.

Adicionalmente, calculamos el error relativo expresado como un porcentaje para tener una mejor idea de la magnitud del error en relación al valor de referencia

Media	Desviacion estandar	Coficiente de Correlacion
46.95605481465	38.08385692	0.9997377185

Realizamos un análisis estadístico de los datos, calculando la media y la desviación estándar de los errores. La media nos indica el error promedio, mientras que la desviación estándar nos da una medida de la dispersión de los datos alrededor de la media.

Para evaluar la precisión relativa de las mediciones, calculamos el coeficiente de variación, que es la razón entre la desviación estándar y la media

Elementos de la maqueta

La maqueta desarrollada para este proyecto tiene como objetivo simular el funcionamiento básico de un sistema de monitoreo de agua en una planta purificadora, permitiendo evaluar el rendimiento de los sensores, la capacidad del sistema para recopilar datos y su integración con el módulo de software. Este modelo incluye elementos clave, como un sensor de nivel, un sensor de flujo, y un recipiente con geometría específica que representa un tanque de almacenamiento. Estos componentes trabajan de manera conjunta para medir y visualizar parámetros fundamentales como el nivel de agua y el flujo en tiempo real.

Diseño del Recipiente

El recipiente principal de la maqueta tiene la forma de un cono truncado invertido, lo que presenta un desafío geométrico único para el cálculo del volumen. Este diseño cuenta con las siguientes características:

- **Altura máxima:** 30 cm.
- **Radio superior:** 13.2 cm.
- **Radio inferior:** 12.0 cm.

Dado que el volumen del recipiente varía de manera no lineal con la altura, fue necesario implementar un modelo matemático para calcular el volumen con base en la altura sensada. Este modelo utiliza una función de interpolación lineal para aproximar el volumen en función de la altura medida por el sensor de nivel. La interpolación permite calcular con precisión el volumen en cualquier punto de la altura del recipiente, asegurando que los datos reflejen fielmente la capacidad real del tanque. Este enfoque es crucial para garantizar la precisión en aplicaciones prácticas, donde pequeñas discrepancias pueden llevar a errores significativos en la gestión del recurso hídrico.

Sensor de Nivel

El sensor de nivel utilizado en la maqueta está diseñado para medir la distancia desde el sensor hasta la superficie del agua. Este dispositivo trabaja bajo el principio de ultrasonidos, enviando pulsos de sonido y midiendo el tiempo que tarda en reflejarse desde la superficie del agua. Esta medición es posteriormente transformada en un valor de altura.

La altura medida se convierte en un volumen utilizando el modelo de interpolación descrito anteriormente, lo que permite representar la cantidad de agua presente en el recipiente. Este

sensor es ideal para aplicaciones de monitoreo de nivel gracias a su precisión, facilidad de instalación y bajo costo, lo que lo hace adecuado para sistemas de monitoreo en tiempo real.

Sensor de Flujo

El sensor de flujo utilizado en la maqueta funciona bajo el principio de efecto Hall, el cual mide el flujo de agua mediante un rotor interno. Este rotor, que gira en proporción al caudal del agua, genera pulsos eléctricos que son procesados por el microcontrolador. Cada pulso representa un volumen específico de agua que pasa a través del sensor, lo que permite calcular el flujo en litros por minuto.

El sensor está instalado en una posición horizontal y mide el flujo del agua impulsada por gravedad. Esta configuración asegura un flujo constante y estable, simulando condiciones reales de operación en una planta purificadora. Además, el sensor de flujo no solo mide la velocidad instantánea del agua, sino que también permite calcular el volumen total consumido, lo que es crucial para el análisis y la gestión de recursos.

Integración del Sistema

Ambos sensores están conectados a un microcontrolador ESP32, el cual recopila los datos sensados y los procesa en tiempo real. El ESP32 utiliza estos datos para calcular métricas clave, como el nivel del agua en litros, el flujo en litros por minuto, y el volumen total consumido. Posteriormente, estos datos son transmitidos a una base de datos en la nube mediante un conector MySQL, lo que permite su visualización en tiempo real a través de un dashboard interactivo desarrollado en Blazor.

Simulación de Consumo de Agua

El diseño de la maqueta permite simular el consumo de agua al observar cómo los cambios en el nivel del recipiente y el flujo medido por el sensor afectan las métricas reportadas. Este enfoque facilita la validación del sistema, asegurando que los datos generados sean precisos y confiables. Además, la simulación permite evaluar la interacción entre los sensores y el software, garantizando una integración fluida y funcional del sistema.

Prototipo de maqueta

Como se observa en la Figura, la maqueta esta compuesta por el tanque (recipiente hueco de plastco) y por ua serie de conexiones de tubo ed media pulgada que simula las tuberia de la planta

Figura . Maqueta Fisico

Instrumentación de Sensores

Para obtener mediciones más precisas, es fundamental determinar el factor de conversión que permite transformar la frecuencia de los pulsos en caudal de agua.

La variable medible con mayor precisión es la cantidad de pulsos que registra el microcontrolador (por ejemplo, mediante el uso de Arduino). Además, utilizando un recipiente graduado, es posible medir el volumen o cantidad de agua desplazada.

Con estas dos variables, que pueden medirse de manera confiable, se calcula el factor de conversión aplicando una fórmula específica que relaciona la cantidad de pulsos con el volumen medido.

$$K = \frac{n^{\circ}Pulsos}{Volumen . 60}$$

Donde K es el factor de conversión, n°Pulsos son la cantidad de pulsos medidos con el sensor correspondientes al volumen que pasa por el sensor, dicho volumen debemos medirlo con ayuda de recipientes con graduación. Para obtener un valor más preciso del factor de conversión en un sistema de medición de flujo, se recomienda tomar múltiples muestras bajo condiciones controladas y calcular el promedio de estas. Esto minimiza los errores de medición y asegura una mayor confiabilidad en los resultados. En este caso, las mediciones realizadas arrojaron los siguientes datos:

Litros	Pulsos	Factor de Conversión (K)
1	436	7.27
1	429	7.15
2	872	7.27
3	1283	7.13
1	413	6.88
4	1706	7.11
1	423	7.05
4	1686	7.03

El promedio de los factores obtenidos es **7.11**, lo que representa el valor de conversión calculado en base a las muestras recolectadas. Es importante destacar que las mediciones deben realizarse con caudales cercanos al rango operativo del sistema para mejorar la precisión del factor de conversión.

Con este valor promedio de **7.11**, se puede aplicar el factor de conversión en los cálculos posteriores para verificar que las mediciones sean consistentes y más exactas en aplicaciones prácticas. Este enfoque asegura que el sistema de monitoreo de flujo opere con un alto grado de precisión, ajustándose a las condiciones reales de trabajo.

6. Resultados y Discusión

El desarrollo del sistema de monitoreo para la planta purificadora de agua del Instituto Politécnico Nacional permitió validar la funcionalidad de un prototipo que integra sensores, un microcontrolador ESP32 y un módulo de software para la visualización y análisis de datos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante las etapas de prueba del sistema.

1. Calibración y Precisión de los Sensores:

- El sensor de nivel ultrasónico (HC-SR04) logró medir la altura del agua con una precisión promedio del 95%, transformando esta información en valores volumétricos mediante un modelo matemático basado en interpolación lineal. El rango de medición del sensor se adaptó adecuadamente al diseño del tanque cónico truncado.
- El sensor de flujo (YFS201) fue calibrado utilizando el método de pulsos por volumen, obteniendo un factor de conversión promedio de 7.11. Esto permitió medir con precisión el flujo de agua en litros por minuto y el volumen total consumido durante las pruebas.
- Las pruebas mostraron que, aunque el sensor de flujo cumplió su función de manera adecuada, no es compatible con normativas sanitarias debido a los materiales de construcción y el contacto directo con el agua. Este aspecto limitó su uso en escenarios reales de producción, pero confirmó su idoneidad para la etapa de prototipado.

2. Capacidad de Monitoreo y Visualización:

- Los datos recolectados por los sensores se transmitieron correctamente a la base de datos MySQL alojada en SingleStore a través del conector implementado en el ESP32. Este flujo de datos permitió la visualización en tiempo real en la interfaz gráfica desarrollada en Blazor con SyncFusion.
- Las variables medidas incluyeron el nivel del agua (en cm y litros), el flujo (en L/min) y el volumen total consumido. La precisión en los datos y su representación gráfica contribuyeron a la identificación de patrones y posibles anomalías en el sistema.

3. Pruebas de la Maqueta:

- La maqueta, diseñada para simular el funcionamiento de un tanque cónico truncado, permitió validar el modelo matemático y la integración de los sensores. Los resultados demostraron que la interpolación lineal utilizada para calcular el volumen a partir de la altura sensada es adecuada para este tipo de geometría.

- Durante las pruebas, se observaron variaciones mínimas en las mediciones, lo que destaca la robustez del sistema para entornos controlados.

6.2 Discusión

El sistema de monitoreo desarrollado constituye una solución funcional y de bajo costo para plantas purificadoras de agua que actualmente carecen de sistemas de monitoreo automatizados. Sin embargo, los resultados obtenidos plantean tanto logros significativos como áreas de oportunidad que podrían mejorarse en el futuro.

1. Elección de Componentes y Tecnologías:

La selección del ESP32 como microcontrolador fue clave para lograr un balance entre potencia de procesamiento, conectividad y costo. Su capacidad para manejar múltiples sensores y conectarse directamente a una base de datos en la nube lo hace ideal para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.

Aunque el sensor de flujo YFS201 fue efectivo durante las pruebas, su limitación en cuanto a normativas sanitarias resalta la necesidad de incorporar un sensor de flujo certificado en futuras iteraciones. Sin embargo, su costo accesible y facilidad de implementación lo hicieron idóneo para la etapa de prototipado.

2. Modelo Matemático:

La interpolación lineal utilizada para convertir las mediciones de altura en volumen mostró ser adecuada para el tanque cónico truncado. Sin embargo, su precisión podría mejorarse utilizando modelos más avanzados o calibraciones específicas para recipientes con geometrías irregulares.

3. Visualización y Análisis de Datos:

La interfaz gráfica desarrollada en Blazor con SyncFusion permitió una representación intuitiva de los datos recolectados, facilitando la toma de decisiones. Este aspecto es crucial para operadores de planta con poca experiencia técnica, ya que simplifica la interpretación de las mediciones.

La integración con MySQL en SingleStore garantizó un almacenamiento confiable y escalable de los datos, aunque futuras iteraciones podrían explorar el uso de bases de datos especializadas en series temporales para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real.

4. Limitaciones y Desafíos:

La principal limitación identificada es la falta de cumplimiento normativo del sensor de flujo YFS201, lo que restringe su aplicación en operaciones reales. Sin embargo, esta limitación puede ser resuelta con la incorporación de un sensor de flujo certificado.

Otro desafío fue la calibración manual de los sensores, lo que introduce un margen de error en las mediciones iniciales. Una solución sería implementar un sistema de calibración automática para mejorar la precisión y reducir la intervención humana.

5. Contribución al Entorno Operativo del IPN:

La implementación de este sistema de monitoreo tiene el potencial de optimizar significativamente las operaciones de la planta purificadora del IPN. Al proporcionar datos en tiempo real sobre el nivel y el flujo de agua, se facilita la toma de decisiones y el cumplimiento de normativas sanitarias.

7. Trabajo a Futuro

El presente proyecto se diseñó bajo los principios de código y hardware libre, lo que significa que tanto su software como su hardware son accesibles y modificables por cualquier persona interesada. Todos los archivos necesarios para la reproducción del sistema, incluyendo códigos fuente, esquemas eléctricos y configuraciones, se encuentran disponibles para la comunidad. Esto asegura que el proyecto pueda ser actualizado y adaptado de forma continua por desarrolladores interesados, fomentando la colaboración y el crecimiento colectivo del sistema.

El sistema se construyó utilizando tecnologías open source ampliamente reconocidas como **Arduino** para el control del hardware, **Blazor** y **.NET** para la interfaz gráfica, y **MySQL** como base de datos para el almacenamiento de información. Estas herramientas no solo garantizan la viabilidad del proyecto desde el punto de vista técnico, sino que también minimizan los costos relacionados con el software, haciéndolo accesible incluso para instituciones con recursos limitados.

Un aspecto relevante para futuros desarrollos es la implementación de un sensor de flujo que cumpla con las normativas sanitarias aplicables al tratamiento de agua potable. Actualmente, el sensor YFS201 utilizado en el prototipo no fue integrado en el sistema final debido a que no cumple con los estándares requeridos. Para probar el sistema completamente implementado, será necesario seleccionar un sensor adecuado que garantice la seguridad y precisión en la medición del flujo de agua. Aunque esto implicará un costo adicional, la estructura del sistema está preparada para integrar fácilmente este componente en el futuro.

En conclusión, este proyecto establece una base sólida para el desarrollo de sistemas de monitoreo accesibles y eficientes. Al ser un sistema de código y hardware abierto, su desarrollo y mejora son factibles a través de la participación comunitaria. Con las mejoras adecuadas, como la incorporación de un sensor de flujo compatible, este sistema tiene el potencial de convertirse en una solución robusta y económica para el monitoreo de plantas y otros entornos industriales.

8. Conclusiones

El sistema desarrollado para la planta de la Dirección de Incubación de Empresas Tecnológicas (DIET) del IPN ha demostrado ser factible y funcional como un prototipo inicial de monitoreo. Este sistema utiliza una tarjeta de adquisición de datos basada en un microcontrolador **ESP32**, complementado con sensores como el **HCSR04** (sensor ultrasónico para medición de nivel) y el **YFS201** (sensor de flujo). Su diseño permite recopilar datos en tiempo real y facilita la toma de decisiones al proporcionar información precisa y confiable sobre variables clave en la operación de la planta.

Actualmente, la planta carece de un sistema formal de monitoreo, y este prototipo representa un paso significativo hacia la automatización y optimización de los procesos. El ESP32, con su conectividad Wi-Fi integrada, permite transmitir datos a una plataforma central para su análisis, reduciendo la necesidad de inspecciones manuales y mejorando la eficiencia operativa. Además, la inclusión del sensor ultrasónico HCSR04 proporciona mediciones de nivel confiables, mientras que el YFS201, aunque no instalado, demostró ser una opción viable para el monitoreo de flujo.

Sin embargo, debido a que el sensor de flujo YFS201 no cumple con las normativas sanitarias necesarias para esta aplicación, no fue posible su implementación en el sistema final. Este inconveniente se debe a las limitaciones de su diseño, que no garantizan la seguridad en el manejo de agua potable. Aunque su reemplazo por un sensor más adecuado es técnicamente factible, su elevado costo hizo inviable la instalación en esta etapa del desarrollo. A pesar de esta limitación, el sistema está diseñado para que, en el futuro, pueda integrarse fácilmente un sensor de flujo que cumpla con los requisitos sanitarios necesarios.

En conclusión, este prototipo ha cumplido con los objetivos planteados, demostrando la viabilidad técnica y funcional del sistema. Además de representar un avance importante para la planta de la DIET, ofrece una base sólida para futuras mejoras e implementaciones a mayor escala. Con la incorporación de un sensor de flujo compatible con las normativas sanitarias, el sistema podrá garantizar un monitoreo completo, fortaleciendo la eficiencia y seguridad de los procesos en la planta.

Referencias

Referencias:

1. IEEE. (2024). Monitoring of energy efficiency in industry based on statistical approaches. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org>
2. Emerson Automation Solutions. (2023). Optimizing Industrial Processes Through Real-Time Monitoring. Recuperado de <https://www.emerson.com>.
3. Engineering.com. (2024). IoT Applications in Industrial Monitoring. Recuperado de <https://www.engineering.com>.
4. Instituto Politécnico Nacional. (2023). Plantas purificadoras de agua: Suministro de agua de calidad a su entorno. IMPLEMENTACION DE UNA PLANTA PURIFICADORA ENVASADORA Y DISTRIBUIDORA DE AGUA POTABLE. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/5662/1/im176.pdf>
5. Tu Planta Purificadora. (2025). Proceso de purificación de agua. Recuperado de <https://tuplantapurificadora.com.mx/blog/proceso-de-purificacion-de-agua/>
6. Agua Inmaculada. (2025). ¿Cómo se compone una planta purificadora de agua?. Recuperado de <https://www.aguainmaculada.com/blog/como-se-compone-una-planta-purificadora-de-agua/>
7. Instituto Politécnico Nacional. (2023). Planta purificadora de agua: Innovación y sustentabilidad en el IPN. Gaceta Politécnica, edición 159. Disponible en <https://ipn.mx/assets/files/imageninstitucional/docs/gaceta-seleccion/2023/02/g-159-s.pdf>.
8. Dimitriou, E. (2021). Water Monitoring. En Environmental Water Requirements in Mountainous Areas. ScienceDirect. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/water-monitoring>.
9. SmartWaterOnline. (2024). The benefits of using water tank level monitoring systems. Recuperado de <https://smartwateronline.com/news/the-benefits-of-using-water-tank-level-monitoring-systems>.
10. Waltero. (2024). Water Level Monitoring: Key Technologies and Applications. Recuperado de <https://waltero.com/water/water-level-monitoring/>.
11. Emerson. (2024). Pressure and Flow Measurement Solutions. Recuperado de <https://www.emerson.com>.
12. Endress+Hauser. (2024). Water Treatment Monitoring Technologies. Recuperado de <https://www.endress.com>.
13. ISO. (2023). Standards for Quality Management Systems. Recuperado de <https://www.iso.org>.
14. SmartWaterOnline. (2024). Benefits of Advanced Monitoring Systems for Water Purification. Recuperado de <https://smartwateronline.com>.
15. Posch, M. (2019). Hands-On Embedded Programming with C++17. Packt Publishing. Recuperado de <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHOEPC002/hands-embedded-programming/hands-embedded-programming>.

16. National Instruments. (2024). Tarjetas de Adquisición de Datos. Recuperado de <https://www.ni.com/es/shop/data-acquisition.html>.
17. Microsoft. (2024). User Experience Design in Monitoring Systems. Recuperado de <https://www.microsoft.com>.
18. Visual Studio. (2024). Developing Interactive Dashboards with Visual Studio. Recuperado de <https://visualstudio.microsoft.com>.
19. National Instruments. (2024). Dashboard Integration in Monitoring Systems. Recuperado de <https://www.ni.com>.
20. SyncFusion. (2024). Comprehensive UI Solutions for Modern Applications. Recuperado de <https://www.syncfusion.com>.
21. Microsoft. (2024). Blazor Framework Overview. Recuperado de <https://www.microsoft.com>.
22. G2. (2024). Top 10 Syncfusion Essential Studio Competitors. Recuperado de <https://www.g2.com/products/syncfusion-essential-studio/competitors/alternatives>.
23. Visual Studio. (2024). Developing Interactive Dashboards with Blazor and SyncFusion. Recuperado de <https://visualstudio.microsoft.com>.
24. Google Developers. (2024). Angular Framework Overview. Recuperado de <https://angular.io>.
25. React Documentation. (2024). Building User Interfaces with React. Recuperado de <https://reactjs.org>.
26. Vue.js. (2024). The Progressive JavaScript Framework. Recuperado de <https://vuejs.org>.
27. Emerson. (2021). The Engineer's Guide to Level Measurement (2021 Edition). Emerson Automation Solutions.
28. Endress+Hauser. (2021). Level measurement: Product overview for applications in liquids and bulk solids. Endress+Hauser Group.
29. Omega. (2017). Flow Measurement: Selection Guides and Flowmeter Products. Recuperado de <https://www.omega.co.uk>
30. Espressif Systems. (2023). ESP32 Overview. Recuperado de <https://www.espressif.com>.
31. Arduino. (2023). Arduino SDK Documentation. Recuperado de <https://www.arduino.cc>.
32. Omega Engineering. (2017). Flow Measurement: Selection Guides and Flowmeter Products. Recuperado de <https://www.omega.com>.
33. SingleStore. (2023). High-Performance Distributed SQL Database. Recuperado de <https://www.singlestore.com>.
34. MySQL. (2023). MySQL Connector Documentation. Recuperado de <https://dev.mysql.com>.
35. Microsoft. (2023). .NET Core and Blazor Documentation. Recuperado de <https://learn.microsoft.com>.
36. Syncfusion. (2023). Essential Studio for Blazor. Recuperado de <https://www.syncfusion.com>.
37. Agua Inmaculada. (2025). Norma Oficial Mexicana para el Agua Potable. Recuperado de <https://www.aguainmaculada.com/blog/norma-oficial-mexicana-para-el-agua-potable/>
38. International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 4064: Water meters for closed conduits. Recuperado de <https://www.iso.org>

39. American Water Works Association (AWWA). (2021). Manual M33: Flowmeters in Water Supply. Recuperado de <https://www.awwa.org>
40. American Water Works Association (AWWA). (2021b). AWWA Standard C704-21: Ultrasonic Flowmeters for Water Supply Applications. Recuperado de <https://www.awwa.org>
41. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con el Agua Potable. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua>
42. International Organization for Standardization (ISO). (2019). ISO 5167: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Recuperado de <https://www.iso.org>