



# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

## ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”

### MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

*Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021*

#### PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER

---

**Título del proyecto:**

Diseño e implementación de una interfaz humano-máquina para optimizar la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo.

**Línea de Investigación:**

Ciencias de ingeniería de control y automatización aplicada a la industria del petróleo.

**Campo amplio de conocimiento:**

Ingeniería de control y automatización con un enfoque en la Industria del petróleo

**Autor/a:**

Mg. Juan Carlos Córdova Suárez

**Tutor/a:**

PhD. Maryory Urdaneta / Mg. Wilmer Albarracín

Quito – Ecuador

2024

## APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, Maryory Urdaneta con C.I: 1759316126 en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: Diseño e implementación de una interfaz humano-máquina para optimizar la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo.

Elaborado por: Juan Carlos Córdova Suárez, de C.I: 1804006037, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 12 marzo de 2024

---

**Firma**

## DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, Juan Carlos Córdova Suárez con C.I: 1804006037, autor del proyecto de titulación denominado: Diseño e implementación de una interfaz humano-máquina para optimizar la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo. Previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y Automatización.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor@ del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
3. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 12 marzo de 2024

---

**Firma**

## Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE .....	iii
INFORMACIÓN GENERAL .....	1
Contextualización del tema.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:.....	3
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	5
1.1. Contextualización general del estado del arte.....	5
1.2. Proceso investigativo metodológico .....	11
CAPÍTULO II: PROPUESTA.....	18
2.1. Fundamentos teóricos aplicados .....	18
2.2. Descripción de la propuesta.....	24
2.3. Validación de la propuesta.....	35
2.4. Matriz de articulación de la propuesta .....	44
2.5. Análisis de Resultados .....	46
2.5.1. Efectividad de la interfaz humano-máquina (HMI):.....	46
CONCLUSIONES .....	52
RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

## Índice de tablas

Tabla 1 Cálculo de Universo, Muestra y Margen de Error. ....	13
Tabla 2 Equipos internos en panel de control.....	30
Tabla 3 Descripción perfil validadores. ....	36
Tabla 4 Criterios de evaluación del proyecto.....	36
Tabla 5 Resultados porcentuales del cuestionario de validación del proyecto.....	38
Tabla 6 Matriz de articulación.....	44
Tabla 7 Encuesta telefónica para registrar datos de usuarios. ....	46

## Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de Flujo de actividades para el desarrollo del HMI. ....	12
Figura 2 Fallas en sistemas de dosificación.....	14
Figura 3 Tiempo empleado por el operador. ....	15
Figura 4 Importancia de sensor de Presión.....	15
Figura 5 Eficiencia en mantenimientos.....	16
Figura 6 Factibilidad para desarrollo de HMI en facilidades.....	16
Figura 7 Interés de la automatización en diferentes operadoras.....	17
Figura 8 Visor de Nivel con Mirilla. ....	19
Figura 9 Sensores de nivel.....	20
Figura 10 Sensor de Flujo. ....	21
Figura 11 Sucesos importantes de los autómatas programables. ....	22
Figura 12 Ciclo de escaneo del PLC. ....	23
Figura 13 Mapa Conceptual, Arquitectura de un HMI.....	23
Figura 14 Organizador gráfico del prototipo de dosificación automatizado. ....	25
Figura 15 Componentes del skid de químico automatizado.....	25
Figura 16 Skid para dosificación química. ....	26
Figura 17 Bomba de pistón para dosificación química. ....	27
Figura 18 Sensor de Flujo.....	28
Figura 19 Sensor de Presión-Nivel. ....	29
Figura 20 Elementos del tablero de control.....	29
Figura 21 Controlador Simatic S7-1200. ....	31
Figura 22 Interface TIA Portal. ....	32
Figura 23 Ejemplo de configuración de conexión de la pantalla KTP y PLC.....	33
Figura 24 Diseño de la Interface humano-máquina.....	33
Figura 25 Pasos para elaborar una interface humano-máquina. ....	34
Figura 26 Cuestionario de validación del proyecto.....	37
Figura 27 Resultados puntaje por pregunta del cuestionario de validación del proyecto. ....	38
Figura 28 Resultado porcentual – Impacto en cuestionario de validación del proyecto. ....	39
Figura 29 Resultado porcentual – Aplicabilidad en cuestionario de validación del proyecto. .....	39
Figura 30 Resultado porcentual – Conceptualización en cuestionario de validación del proyecto. ....	40
Figura 31 Resultado porcentual – Actualidad en cuestionario de validación del proyecto...	41
Figura 32 Resultado porcentual – Calidad Técnica en cuestionario de validación del proyecto. .....	41
Figura 33 Resultado porcentual – Factibilidad en cuestionario de validación del proyecto.	42
Figura 34 Resultado porcentual – Pertinencia en cuestionario de validación del proyecto.	42
Figura 35 Dosificación / Con HMI vs Sin HMI.....	47
Figura 36 HMI-Pantalla Inicio.....	47
Figura 37 HMI-Pantalla Principal.....	48
Figura 38 HMI-Pantalla Tendencias.....	48
Figura 39 Pantalla HMI-Alarmas.....	49
Figura 40 HMI-Pantalla Proceso.....	49
Figura 41 HMI-Pantalla Nivel.....	50
Figura 42 Pantalla HMI-Presión.....	50
Figura 43 Fotografía prototipo HMI dosificación química.....	51

## INFORMACIÓN GENERAL

### Contextualización del tema

Según argumenta el Handbook de Baker Hughes, un sistema BES tiene como objetivo levantar el flujo multifásico (agua+gas+petróleo) comenzando en el fondo del pozo hasta el cabezal del pozo, los equipos (Motor, Sellos, Bombas, Tuberías) instalados en el fondo del pozo están expuestos a diferentes problemáticas como incrustación de sólidos, corrosión, emulsiones, alta viscosidad, que afectan a los componentes del sistema, reducen su vida operativa, causando un alto impacto económico en los costos de taladros, herramientas, maquinaria, personal, requeridos para el cambio de equipos luego de la falla. Para poder mitigar estos problemas se dispone de un proceso en superficie con productos químicos que son almacenados en tanques para luego ser inyectados al fondo del pozo mediante tubos capilares impulsados por una bomba de pistón controlada manualmente por un operador (Hughes, 2022).

La industria del petróleo y gas enfrenta constantes desafíos para optimizar la eficiencia y la rentabilidad en sus operaciones. Uno de los aspectos críticos en este ámbito es la optimización del proceso, especialmente en pozos con levantamiento artificial de petróleo. La eficacia depende en gran parte de la dosificación precisa de productos químicos en el subsuelo para incrementar la producción de crudo y prolongar el tiempo de vida de los equipos electrosumergibles.

La extracción de petróleo representa un eterno desafío para la industria de hidrocarburos. En particular, la optimización de pozos mediante levantamiento artificial conlleva complejos procesos que dependen en gran medida de una precisa dosificación de aditivos químicos. La dosificación química en pozos con levantamiento artificial de petróleo es una práctica común para mejorar la movilidad del petróleo en la formación subterránea, reducir la viscosidad del crudo y controlar la presión del pozo. Sin embargo, la dosificación precisa y oportuna de estos productos químicos es fundamental para evitar problemas operativos, como la corrosión, emulsión, precipitación de escala en superficies internas y externas de los equipos electrosumergibles.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de dosificación química en la industria del petróleo depende de la intervención humana, durante este proceso, los operadores utilizan visores mirillas como indicador visual de flujo y bombas de pistón con ajuste manual. Estos sistemas pueden verse limitados por la imprecisión en la dosificación de química, la respuesta lenta a los cambios en las condiciones del pozo y la dificultad para monitorear y ajustar los procesos de manera efectiva. Pese a ello, la dependencia de la supervisión humana y las limitadas interfaces

hombre-máquina dificultan enormemente la dosificación ideal en la mayoría de las operaciones de estimulación de pozos.

En este contexto, el diseño, ejecución, de una interfaz humano-máquina para optimizar la dosificación química en pozos con levantamiento artificial de petróleo emerge como una necesidad imperativa. Una interfaz avanzada que integre tecnologías modernas de control y automatización podría ofrecer beneficios significativos, como la mejora de la precisión en la dosificación, la reducción de costos operativos, la minimización de riesgos ambientales y la optimización global de los procesos de extracción.

Esta investigación se propone abordar esta necesidad urgente mediante el diseño y desarrollo de una interfaz humano-máquina innovadora y efectiva que permita una dosificación química más precisa, oportuna y eficiente en los pozos con levantamiento artificial de petróleo. Al explorar nuevas tecnologías y enfoques de ingeniería, se busca contribuir al avance y la mejora continua en la industria del petróleo y gas, impulsando la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental.

El prototipo constará de una pantalla HMI para la supervisión, un PLC para el procesamiento de datos, puerto de comunicación Modbus, una bomba de pistón para la inyección precisa de productos químicos, sensores de nivel, presión y flujo para monitorear las condiciones del sistema. Estos componentes trabajarán juntos para garantizar una dosificación química eficiente en los pozos.

## **Problema**

La dosificación y control de productos químicos en los pozos equipados con sistemas de levantamiento artificial de petróleo se enfrenta a ineficiencias significativas. La falta de precisión en este proceso puede resultar en una utilización ineficiente de los químicos, afectando negativamente la producción, la rentabilidad de los pozos y ocasionar fallas en los equipos electro-sumergibles.

Para abordar esta problemática, se propone integrar sensores especializados y una interfaz humano-máquina innovadora en el proceso de dosificación de inyección de químicos en los sistemas de levantamiento artificial de petróleo. Esta solución busca mejorar la supervisión en tiempo real de diferentes variables, la precisión en la dosificación y la capacidad de ajuste del sistema en los pozos petroleros.

## **Objetivo general**

Desarrollar e implementar una interfaz humano-máquina eficiente y efectiva que optimice el sistema de dosificación química en pozos con levantamiento artificial de petróleo, mediante la integración de sensores y tecnología adecuada, con el fin de optimizar la precisión en el proceso de inyección de productos químicos en la industria petrolera.

## **Objetivos específicos**

- Contextualizar la información teórica relacionada con el proceso de dosificación química en pozos petroleros.
- Seleccionar los sensores más adecuados para medir el caudal de químico, el nivel en los tanques de almacenamiento de químicos y la presión a la salida de la bomba de pistón.
- Validar el correcto funcionamiento de la interfaz humano-máquina diseñada, así como realizar el acondicionamiento de variables necesarias para garantizar una comunicación efectiva y una interfaz intuitiva para los operadores.
- Comparar la efectividad del sistema visual de mirilla con el sistema digitalizado de contabilización de flujo a través de pruebas experimentales con los especialistas.

## **Beneficiarios directos y vinculación con la sociedad:**

El proyecto de titulación "Diseño e Implementación de una Interfaz Humano-Máquina para Optimizar la Dosificación Química en los Pozos con Levantamiento Artificial de Petróleo" no solo se enfocará en la investigación y desarrollo técnico, sino que también buscará establecer una fuerte vinculación con la sociedad y generar un impacto significativo. A continuación, se describen las estrategias para lograr este objetivo y los beneficios para los beneficiarios directos:

**Capacitación y Asesoría:** Se ofrecerán capacitaciones y asesorías técnicas a empresas petroleras, personal de operaciones y estudiantes interesados en la optimización de procesos de extracción de petróleo. Estas capacitaciones abordarán temas relacionados con la dosificación química, el uso de la interfaz humano-máquina y las mejores prácticas en la operación de sistemas de levantamiento artificial de petróleo.

**Contribución a la Sociedad:** La implementación de una interfaz humano-máquina eficiente y efectiva en los pozos petroleros con levantamiento artificial no solo mejorará la eficiencia operativa y la rentabilidad de las empresas petroleras, sino que también contribuirá a la reducción de huella de carbono, adicional causará un impacto ambiental al optimizar el uso de productos químicos y minimizar los derrames y contaminaciones.

Publicaciones: Se publicarán los resultados de la investigación y se generará oportunidad de mejorar el proceso actual incluyendo a futuro controladores, cálculos con inteligencia artificial y control remoto. Estos materiales estarán disponibles para ser difundidos en la comunidad académica además de estar disponibles para profesionales interesados en el área de estudio.

Productos Tecnológicos: El desarrollo de la interfaz humano-máquina y otros componentes tecnológicos del proyecto podrían dar lugar a la creación de productos tecnológicos comercializables. Estos productos podrían ser licenciados a empresas del sector petrolero o utilizados para desarrollar soluciones a medida para diferentes aplicaciones industriales.

Los beneficiarios directos de este proyecto de titulación incluyen empresas petroleras y de servicios relacionados, personal técnico y operativo en la industria del petróleo, estudiantes y académicos interesados en la ingeniería de petróleo y tecnologías de control, así como la sociedad en general, que se verá beneficiada por una extracción de petróleo más eficiente y sostenible.

## CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1. Contextualización general del estado del arte

Tomando como punto de partida las teorías que otorgan bases sólidas al presente estudio y consolidando los conocimientos previos en la materia, se establecen las siguientes generalizaciones:

**Integración de Tecnologías Emergentes:** La integración de herramientas innovadoras de automatización ofrecen una oportunidad sin precedentes para perfeccionar sustancialmente las capacidades de seguimiento y ajuste dinámico de los procedimientos de dosificación química en pozos petroleros con equipo electro-sumergible y en cualquier industria (León & Pillajo, 2013).

**Visualización de Datos en Tiempo Real:** La combinación de sistemas de monitoreo en tiempo real, que utilizan sensores e interfaces gráficas, ofrecen una mejoría estratégica sin precedentes en la gestión de procesos industriales. Esta innovadora capacidad de visualizar datos críticos de manera instantánea y continua revoluciona la toma de decisiones, permitiendo a los operadores y gerentes acceder a información vital en el preciso momento en que se genera. A diferencia de los métodos manuales tradicionales, que requieren mediciones puntuales e ineficientes, estos sofisticados sistemas de medición automatizada brindan una eficiencia y precisión incomparables, (Molina & Jiménez, 2013).

Con la capacidad de recopilar y procesar enormes volúmenes de datos en cuestión de segundos, estas herramientas de vanguardia permiten detectar anomalías, desviaciones y patrones inusuales con una velocidad y agudeza que supera ampliamente las capacidades humanas. Esta detección temprana de problemas potenciales se traduce en una ventaja competitiva crucial, ya que permite a las empresas reaccionar de manera proactiva y oportuna ante cualquier situación que pueda afectar la calidad, la seguridad o la productividad de sus operaciones. Al contar con información precisa y actualizada en todo momento, los responsables pueden optimizar el proceso, prevenir fallos, reducir tiempos de inactividad y, en última instancia, maximizar la eficiencia y rentabilidad de sus instalaciones industriales (Fernández, 2021).

**Interacción Multimodal y Adaptativa:** El desarrollo de interfaces HMI que permiten interacciones múltiples y ajustables supone un importante progreso para optimizar la manera en que los operadores interactúan con el sistema e incrementar la productividad en ambientes industriales. Este enfoque innovador para la comunicación entre humanos y máquinas supera las restricciones de los métodos convencionales, brindando a los operadores diversas formas de

interacción que se acomodan de manera flexible a sus preferencias personales y a los requerimientos particulares de cada escenario. Mediante la integración de tecnologías de vanguardia, como el reconocimiento de voz, los gestos, el seguimiento ocular y las interfaces táctiles, los sistemas HMI con Interacción Multimodal y Adaptativa permiten a los usuarios interactuar con la interfaz de la manera más natural e intuitiva posible. Esta flexibilidad sin precedentes en la comunicación hombre-máquina se traduce en una mayor comodidad y facilidad de uso para los operadores, reduciendo la curva de aprendizaje y minimizando la carga cognitiva asociada con la navegación y el control de los sistemas (Monzó, 2014).

**Seguridad y Confidencialidad de Datos:** Según se detalla en el libro de protección de datos, es crucial implementar medidas de seguridad sólidas para proteger nuestra interfaz humano-máquina (HMI) contra accesos no autorizados y mantener la integridad de nuestras operaciones. Esto implica cosas como asegurarse permitir el acceso al sistema solo a usuarios autorizados, mediante métodos de autenticación robustos como contraseñas seguras o sistemas biométricos (Miguel, 2015).

Además, es fundamental encriptar nuestros datos para que incluso si alguien intenta acceder de manera no autorizada, no puedan comprender ni manipular la información sensible que manejamos en el HMI. Estas medidas nos ayudan a mantener un entorno confiable para nuestras operaciones. En el ámbito de los entornos industriales altamente conectados y digitalizados de hoy en día, la implementación de robustas medidas de seguridad y protección de datos se ha convertido en tema muy importante. Con la creciente integración de sistemas de control, redes de sensores y plataformas de análisis de datos, la cantidad de información sensible generada y transmitida en estos entornos ha alcanzado niveles sin precedentes. En este escenario, garantizar la confidencialidad, disponibilidad de estos valiosos activos digitales es fundamental para salvaguardar las operaciones, la propiedad intelectual y aportar en el éxito de las empresas (Vega, 2021).

**Automatización de procesos:** La implementación de un Interfaz Humano-Máquina (HMI) en la dosificación química de pozos petroleros posibilita la automatización de este proceso, lo que resulta en un control más preciso y eficiente. Al integrar un HMI, se minimizan los errores humanos asociados con la intervención manual, lo que contribuye a mejorar la calidad y consistencia de las operaciones. Además, esta automatización permite una respuesta inmediata a los cambios que se presentan en el pozo petrolero, optimizando así la eficiencia operativa y mejorando a la vez los tiempos de inactividad (Márquez, 2021).

**Optimización de la producción:** Una interface humano-maquina diseñada de una forma adecuada, puede ser utilizada para maximizar la productividad del pozo y prolongar la vida útil del equipo electro-sumergible. La producción de petróleo es una actividad primordial en la economía global y una de las fuentes más significativas de energía y materias primas para muchas industrias. Sin embargo, el proceso de recuperación de petróleo no es trivial y requiere sistemas y tecnologías avanzados para maximizar la producción y garantizar la eficiencia operativa. Un método utilizado para aumentar la producción de petróleo es el levantamiento artificial de petróleo, que implica inyectar líquido o gas en un pozo para mejorar el flujo de petróleo bajo tierra. Uno de los aspectos clave del levantamiento artificial de petróleo es la dosificación de productos químicos, que implica inyectar productos químicos en el pozo para cambiar las propiedades del fluido y facilitar su recuperación. La estequiometría se puede utilizar para reducir la viscosidad del petróleo, controlar la presión del pozo, prevenir la sedimentación y mejorar la eficiencia de la producción. Sin embargo, la dosificación de productos químicos requiere una dosificación de productos químicos precisa y controlada, lo que puede resultar difícil en condiciones operativas variables y entornos remotos. Actualmente, la dosificación de productos químicos en los pozos de producción se realiza mediante sistemas habituales que obedecen en gran parte de la intervención manual y también de interfaces de usuario ineficientes. Estos sistemas adolecen de problemas de precisión, respuesta lenta a los cambios en las condiciones del pozo y dificultad para monitorear y controlar eficazmente el proceso de dosificación. Además, la falta de automatización y optimización de la dosificación de productos químicos puede provocar un uso ineficiente de los productos químicos y efectos negativos en la producción y el medio ambiente. Para abordar estos desafíos, existe un interés creciente en desarrollar sistemas y tecnologías avanzados para optimizar la dosificación de químicos en los pozos de producción. Uno de los campos de investigación más prometedores es el diseño y la implementación de interfaces hombre-máquina (HMI) que puedan monitorear de manera más eficiente el proceso de dosificación de químicos. Estas interfaces avanzadas pueden integrar tecnologías de control y automatización para mejorar la precisión, eficiencia y seguridad de la dosificación de productos químicos y facilitar el monitoreo y control remoto de procesos en ubicaciones remotas. En este contexto, este tutorial titulado "Diseño e implementación de interfaces hombre-máquina para la optimización de la dosificación de productos químicos en pozos de extracción de petróleo artificiales" se lleva a cabo como parte de esta dirección de investigación y desarrollo en la producción del petróleo. El objetivo del programa es implementar una interfaz hombre-máquina innovadora y eficiente para hacer que la dosificación de productos químicos en los pozos de producción de petróleo sea más precisa, eficiente y controlada, ayudando a mejorar la eficiencia, la rentabilidad y la sostenibilidad

ambiental de la industria. Para conseguir este objetivo, se realizará una revisión integral del estado del arte en metrología química en la industria del petróleo y en el diseño e implementación de interfaces hombre-máquina y sistemas de control avanzados. Esta revisión identificará las últimas tendencias, tecnologías y mejores prácticas en el campo, suministrando una base consistente para el diseño e implementación del sistema propuesto. Además, se llevarán a cabo pruebas y verificaciones de laboratorio y de campo para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema desarrollado y garantizar su viabilidad y aplicabilidad en entornos operativos reales. En resumen, el curso "Diseño e implementación de interfaces hombre-máquina para optimizar la dosificación de productos químicos en pozos petroleros de levantamiento artificial" se considera una contribución significativa al progreso y la mejora de las prácticas en la industria petrolera, buscando mejorar la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad ambiental de las operaciones de producción de petróleo (Hughes, 2022).

**Integración de sistemas:** Es primordial que la interfaz humano-máquina (HMI) pueda integrarse de manera fácil y sin dificultades con los sistemas de adquisición de datos ya presentes en el campo petrolero. Esto garantiza que la información fluya de manera coherente entre todos los sistemas y que la operación en el campo sea unificada y eficiente. Para lograr esto, necesitamos asegurarnos de que el HMI sea compatible con los protocolos de comunicación estándar utilizados en la industria petrolera, como Modbus, Profibus, Profinet y que pueda conectarse fácilmente a los sistemas de adquisición de datos. Además, es sustancial que el HMI pueda realizar la interpretación de los datos recibidos de la instrumentación o sensores de campo y presentarlos de manera clara y amigable para los usuarios, lo que requiere una metódica planificación y elaboración de la interfaz. En resumen, la integración con diferentes protocolos de campo y elaboración de una interface apropiada, es crucial para certificar una operación eficiente de los operadores (Márquez, 2021).

**Capacidad de escalamiento:** Cuando diseñamos nuestra interfaz humano-máquina (HMI), es importante pensar en el futuro. Necesitamos asegurarnos de que el diseño tenga la flexibilidad necesaria para adaptarse a posibles expansiones del campo petrolero o la integración de nuevas tecnologías de optimización de pozos. Esto significa que nuestro HMI debe ser escalable, es decir, capaz de crecer y evolucionar junto con las necesidades cambiantes de la operación. De esta manera, podemos estar preparados para cualquier cambio o mejora que pueda surgir en el futuro, sin tener que hacer grandes modificaciones en nuestro sistema. Al considerar esta capacidad de escalamiento en el diseño del HMI, podemos garantizar una mayor durabilidad y eficiencia a largo plazo en nuestra operación petrolera (Pallas, 2004).

Estos conceptos relacionados establecen los cimientos para crear una interfaz humano-máquina (HMI) que sea no solo efectiva, sino también eficiente. Esto significa que el HMI será capaz de mejorar la dosificación química en los pozos petroleros, lo que a su vez incrementará la productividad y reducirá los costos operativos. La extracción de petróleo es una actividad fundamental para la economía mundial, siendo una de las más importantes fuentes de energía y materia prima para numerosas industrias. Sin embargo, el proceso de extracción de petróleo no es trivial y requiere de sistemas y tecnologías avanzadas para maximizar la producción y garantizar la eficiencia operativa. Uno de los métodos más utilizados para incrementar la producción de petróleo en los pozos es el levantamiento artificial de petróleo, que consiste en la inyección de fluidos o gases en el pozo para mejorar la movilidad del petróleo en el subsuelo (Hughes, 2022).

Dentro del levantamiento artificial de petróleo, uno de los aspectos críticos es la dosificación química, que implica la inyección de productos químicos en el pozo para modificar las propiedades del fluido y facilitar su extracción. La dosificación química puede ser utilizada para reducir la viscosidad del petróleo, controlar la presión del pozo, prevenir la formación de depósitos y mejorar la eficiencia de la producción. Sin embargo, la dosificación química requiere de una dosificación precisa y controlada de los productos químicos, lo cual puede ser un desafío en condiciones operativas variables y en entornos remotos.

En la actualidad, la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo se realiza utilizando sistemas convencionales que dependen en gran medida de la intervención humana y de interfaces de usuario poco eficientes. Estos sistemas pueden presentar problemas de precisión, respuesta lenta a los cambios en las condiciones del pozo y dificultades en la supervisión y control efectivo de los procesos de dosificación. Además, la falta de automatización y optimización en la dosificación química puede resultar en un uso ineficiente de los productos químicos y en impactos negativos en la producción y el medio ambiente (Hughes, 2022).

En respuesta a estos desafíos, se ha derivado un progresivo interés en el desarrollo de sistemas y tecnologías avanzadas para optimizar la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo. Dentro de la investigación, el diseño e implementación de interfaces humano-máquina (HMI) que permitan una supervisión y control más eficientes de los procesos de dosificación química es considerada un área muy prometedora. Estas interfaces avanzadas pueden integrar tecnologías de control y automatización para mejorar la precisión,

eficiencia y seguridad en la dosificación química, así como para facilitar la supervisión y el control remoto de los procesos desde ubicaciones remotas.

En este contexto, el presente proyecto de titulación se enmarca dentro de esta tendencia de investigación y desarrollo en la industria petrolera. El objetivo del presente proyecto es desarrollar una interfaz humano-máquina innovadora y efectiva que permita una dosificación química más precisa, eficiente y controlada en los pozos con levantamiento artificial de petróleo, contribuyendo así a mejorar la eficiencia operativa, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental de la industria.

En resumen, el proyecto de titulación "Diseño e Implementación de una Interfaz Humano-Máquina para Optimizar la Dosificación Química en los Pozos con Levantamiento Artificial de Petróleo" se presenta como una contribución significativa al avance y mejora continua de buenas prácticas en la industria del petróleo, impulsando la eficiencia operativa, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental de la extracción de petróleo.

### **1.1.2. Desarrollos previos de interfaces humano-máquina para dosificación química en pozos petroleros**

El tratamiento químico incorrecto puede repercutir en diferentes problemas en los componentes instalados desde el fondo del pozo petrolero hasta el cabezal, en el transcurso del trabajo centra el estudio en la problemática de corrosión que se presenta generalmente cuando si tienen altos niveles de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, sales, bacterias, incremento en la producción de agua, entre otros problemas, que afectan tanto al equipo electro sumergible como a la tubería de producción en cortos periodos de tiempo causando altos impactos económicos ya que el tratamiento químico debe ser preventivo mas no correctivo, una vez que se tiene el problema este es irreversible causando huecos en tuberías que ocasionan recirculación del flujo evitando que el petróleo llegue hacia la superficie, resultando en una falla que causa altos costos operativos que requieren la intervención de un Rig de Workover para retirar todo el conjunto, corregir la falla y luego volver a instalar todos los componentes, además en el tiempo de inactividad se tiene perdida de producción hasta volver a poner en marcha todo el sistema. El trabajo de investigación demuestra con estudios estadísticos que es importante mantener una dosificación adecuada de productos químicos para prevenir este tipo de problemas (Benavides, 2021).

Siguiendo con el estudio de trabajos que pueden ser considerados como estado del arte para el presente proyecto, se considera de gran importancia analizar el aporte de la interface humano máquina de la plataforma LOWIS desarrollada y utilizada en los campos petroleros de la empresa estatal PetroEcuador. Esta plataforma enlaza diferentes áreas de ingeniería buscando optimizar la producción en los sistemas de levantamiento artificial de petróleo con bombas electro sumergibles. Para poder entender cómo se encuentra estructurada esta plataforma, (Gualacata, 2020) explica que LOWIS es una plataforma de software diseñada para mejorar la supervisión tiempo real de los pozos, con capacidad de alertar y proporcionar una visión integrada del rendimiento de los parámetros del fondo del pozo, lo que permite evaluar acciones para mejorar la producción del campo, además actúa como una interfaz estándar para acceder y manipular toda la información relevante de producción. LOWIS también ofrece funcionalidades similares a las de un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos, mostrando eventos y registros de servicio de los pozos de forma gráfica, informes y esquemas para facilitar la identificación de las mejores prácticas y procedimientos operativos (Gualacata, 2020).

Finalmente se toma como referencia otro proyecto, de gran importancia en la industria de levantamiento artificial de petróleo en el cual desarrollaron una interface humano-máquina que además de permitir monitorear las tendencias de los equipos electro sumergibles en tiempo real, realizaba predicciones de diferentes condiciones operativas como, hueco en tubería, eje roto, fluido emulsionado entre otras condiciones que ocasionan fallas prematuras y pérdida de producción. Para realizar estas predicciones tomaron diferentes variables de entrada como presiones, temperaturas, vibraciones, corte de agua, propiedades físico químicas con algoritmos que contenían regresiones lineales y otras ecuaciones. Esto podría servir como antecedente para mejorar escalar al siguiente nivel el presente trabajo de titulación (Adesanwo, Denney, Lazarus, & Bello, 2016).

## **1.2. Proceso investigativo metodológico**

En este proyecto de investigación, se ha combinado la investigación bibliográfica con el enfoque experimental. Inicialmente, se realizó una revisión profunda de la literatura existente para comprender los aspectos fundamentales y las prácticas recomendadas en nuestro campo de estudio. A partir de esta revisión, se identificaron las áreas clave y posibles estrategias para el desarrollo de nuestro prototipo. Posteriormente, se planteó diseñar y construir el prototipo a través de un enfoque experimental, donde se realizó una serie de pruebas y ensayos para mejorar su rendimiento.

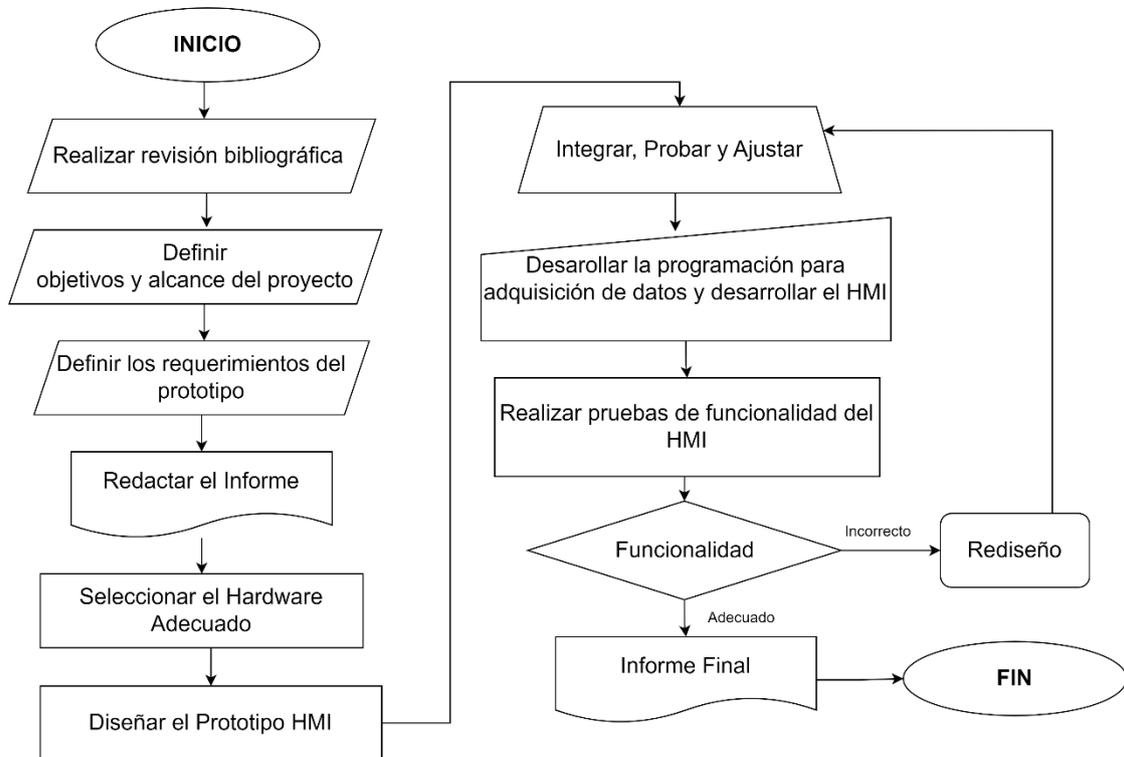
Este proceso fue iterativo, lo que significa que se ajustó y se refinó el diseño del prototipo, basado en los resultados obtenidos en cada prueba. Para garantizar un proceso estructurado y sistemático, se siguió un diagrama de flujo detallado que delineaba todas las etapas del proyecto, desde la conceptualización hasta la evaluación del prototipo. Este enfoque permitió avanzar de manera ordenada hacia nuestros objetivos, asegurando que cumpliéramos con cada paso necesario para lograr el éxito en nuestro proyecto de investigación.

En la Figura 1, se observa un diagrama de flujo con las actividades para el desarrollo del presente proyecto.

Pasos a Realizar:

Realizar revisión bibliográfica, Definir objetivos y alcance del proyecto, Definir los requerimientos del prototipo, Redactar el Informe, Seleccionar el Hardware Adecuado como PLC, Sensores de Nivel, Sensores de Presión, Sensor de Flujo, Bomba de dosificación, material adecuado de componentes, Diseñar el Prototipo HMI, construcción, desarrollo de la programación y finalmente la validación.

**Figura 1**  
Diagrama de Flujo-Actividades para el desarrollo del HMI.



Nota. Elaboración propia.

Para garantizar la construcción de un producto que cumpla los requisitos del sistema, es esencial recopilar información relevante del sector petrolero antes de la elaboración del prototipo. Esto incluye aspectos como las fallas más comunes, los componentes clave del sistema y el tiempo operativo. Para obtener esta información, se pueden emplear diversos métodos de recolección y métodos de análisis de datos. En este caso, se ha optado por una investigación cuantitativa, utilizando el método de encuesta personal. Se implementará un muestreo probabilístico aleatorio, Tabla 1, donde el universo está compuesto por el total de empleados de empresas como PetroEcuador, Repsol y Petrosud. A partir de este universo, se realizará una segmentación en dos grupos de influencia: el Grupo 1, que comprende trabajadores del área de Ingeniería y Corrosión, y el Grupo 2, que abarca trabajadores del área de Levantamiento Artificial.

Para la presente investigación, se ha elegido adoptar un método cuantitativo, centrado en la utilización de encuestas personales como una herramienta para realizar la recolección de datos. Este enfoque permitirá recabar información detallada y precisa sobre diversos aspectos relevantes para el estudio. Además, las encuestas personales brindarán la oportunidad de interactuar directamente con los participantes, lo que facilitará una comprensión más profunda de sus percepciones y experiencias en el ámbito petrolero.

**Tabla 1**  
Cálculo de Universo, Muestra y Margen de Error.

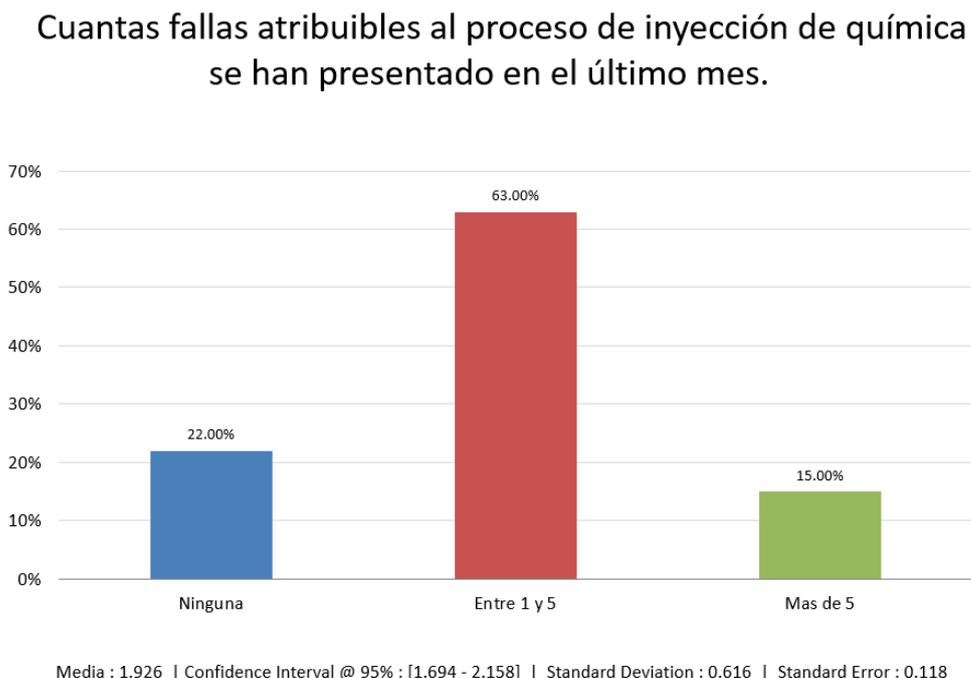
CUADRO DE RESUMEN		
Universo	650	Empleados
Nivel de Confianza	95.00	%
z	1.96	Sigmas
Probabilidad Positiva	50	%
Probabilidad Negativa	50	%
Error Permissible (i)	10	%
Metodo de Calculo	Formula Finita	
Grupo Ingeniería y Corrosión		
Total Grupo 1	65	Empleados
Grupo Levantamiento Artificial		
Total Grupo 2	130	Empleados
Total G1 + G2		
(Grupo 1 + Grupo 2) N	195	Empleados
Calculo de la Muestra		
$n = \frac{N * z^2 * p * q}{i^2 * (N - 1) + z^2 * p * q}$		
n=	$\frac{(195)*(1.96*1.96)*(0,5)*(0,5)}{(0,1*0,1)*(195-1)+(1.96*1.96)*(0,5)*(0,5)}$	
n = 64.57		

Nota. Elaboración Propia.

- Se determinó que el universo es finito.
- 650 encuestados.
- En número de empleados de los grupos de interés es 195. (N)
- Se considera un nivel de confianza de 95%, donde  $z=1.96$ .
- Se trabajó con la Hipótesis de máxima Indeterminación  $p=q=0.5$ .
- Margen de error permisible del 10%.
- El resultado de la muestra es  $n= 64.57$

A continuación, se muestran las gráficas con los resultados de las encuestas realizadas. En la Figura 2, se observa que el 63% de las fallas registradas en un mes, son atribuibles al proceso de dosificación de química con una recurrencia promedio que va ente 1 a 5 fallas, la Figura 3, muestra que el operador demanda entre 1 a 3 horas en realizar un monitoreo diario por pozo en el proceso de dosificación con un 48% de recurrencia, la Figura 4 muestra que en un 96% de casos es importante la detección de capilares taponados, En la Figura 5 se puede observar que en un 74% de los casos no realizan un control de mantenimiento programado para las bombas, finalmente las Figuras 6 y 7 muestran que se tiene una apertura del 100% para incluir sensores al proceso de dosificación actual además, las operadoras de campos petroleros, están dispuestos a correr un piloto.

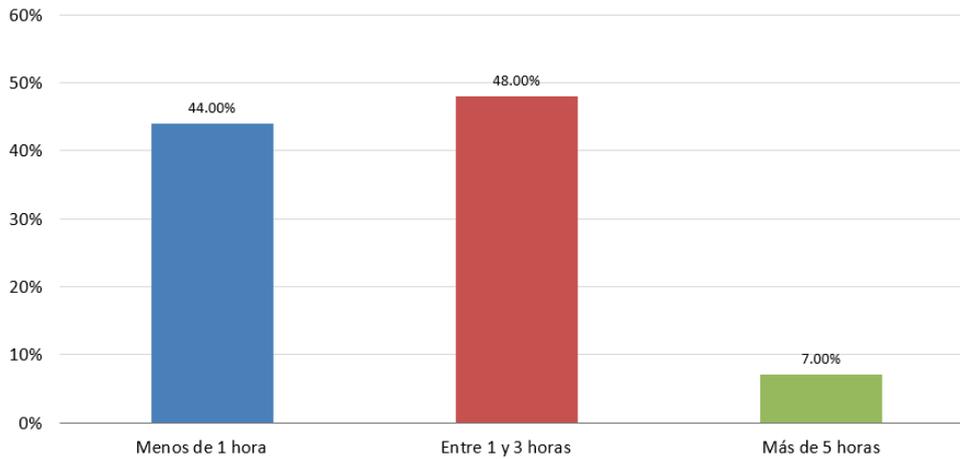
**Figura 2**  
*Fallas en sistemas de dosificación.*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 3**  
*Tiempo empleado por el operador.*

Cuál es el tiempo que le toma al empleado realizar el monitoreo diario de parámetros en el proceso de Inyección de Química de 1 pozo

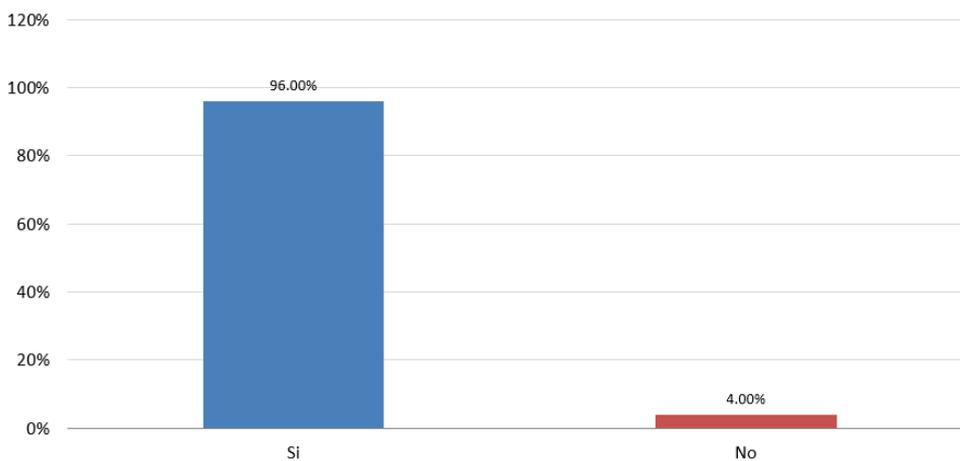


Media : 1.630 | Confidence Interval @ 95% : [1.392 - 1.867] | Standard Deviation : 0.629 | Standard Error : 0.121

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 4**  
*Importancia de sensor de Presión.*

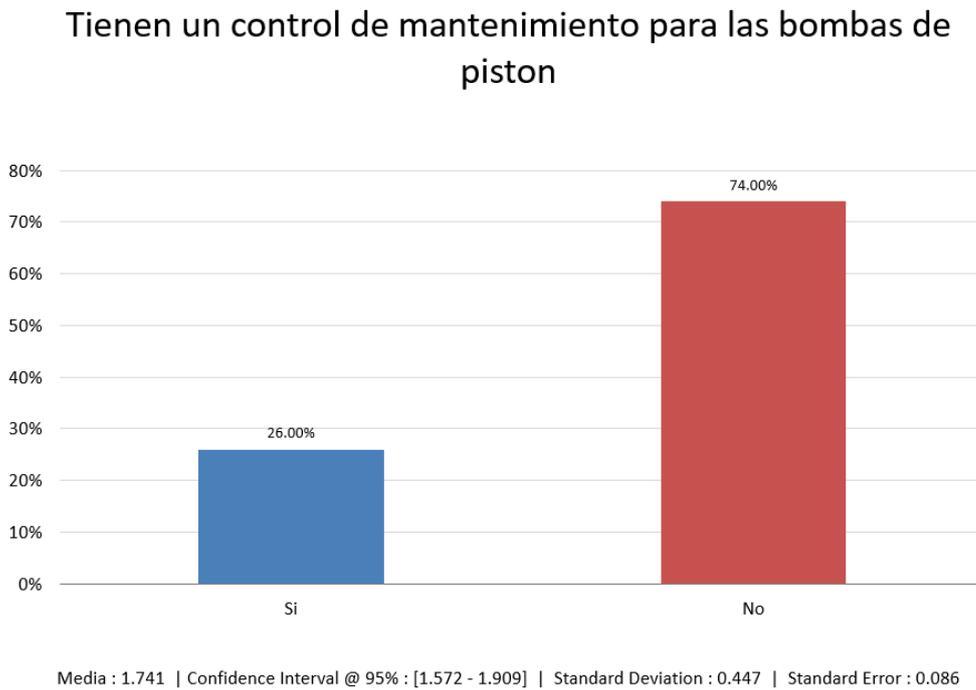
Es importante la detección de capilares taponados?



Media : 1.037 | Confidence Interval @ 95% : [0.964 - 1.110] | Standard Deviation : 0.192 | Standard Error : 0.037

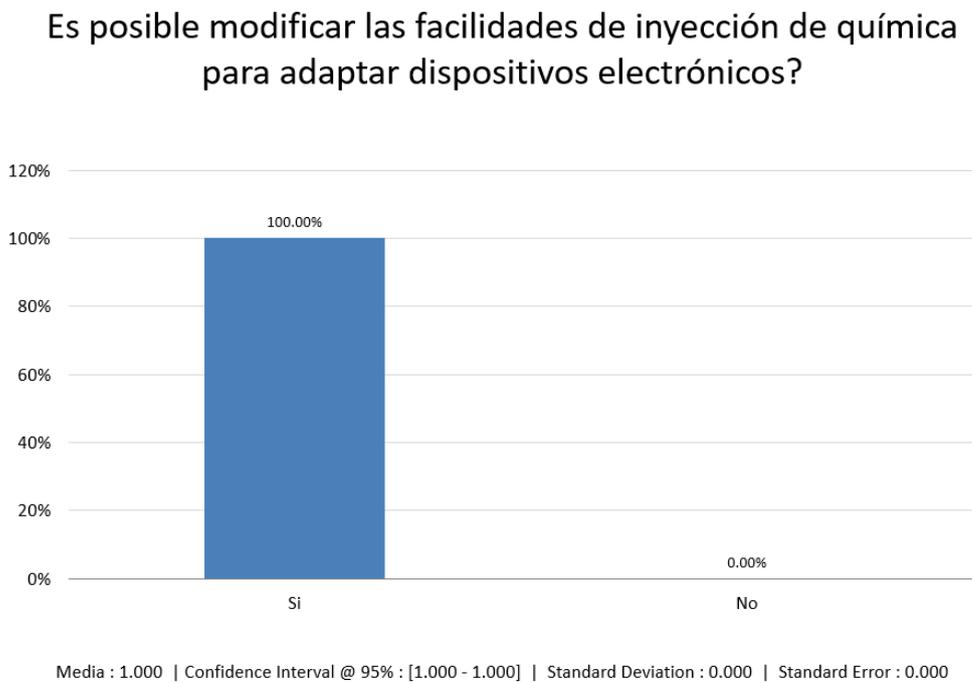
*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 5**  
*Eficiencia en mantenimientos.*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 6**  
*Factibilidad para desarrollo de HMI en facilidades.*

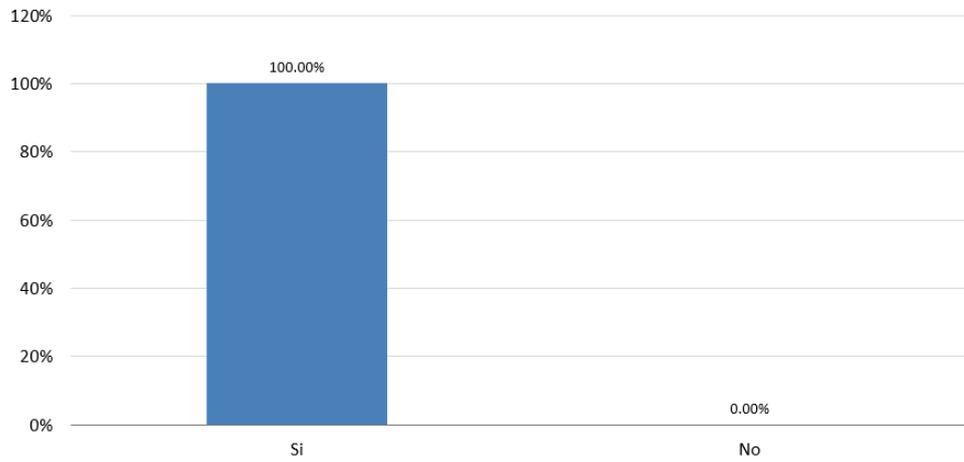


*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 7**

*Interés de la automatización en diferentes operadoras.*

Estarían dispuestos a correr un proyecto Piloto para evaluar la eficiencia del sistema actual de inyección de química?



Media : 1.000 | Confidence Interval @ 95% : [1.000 - 1.000] | Standard Deviation : 0.000 | Standard Error : 0.000

*Nota.* Elaboración propia.

## CAPÍTULO II: PROPUESTA

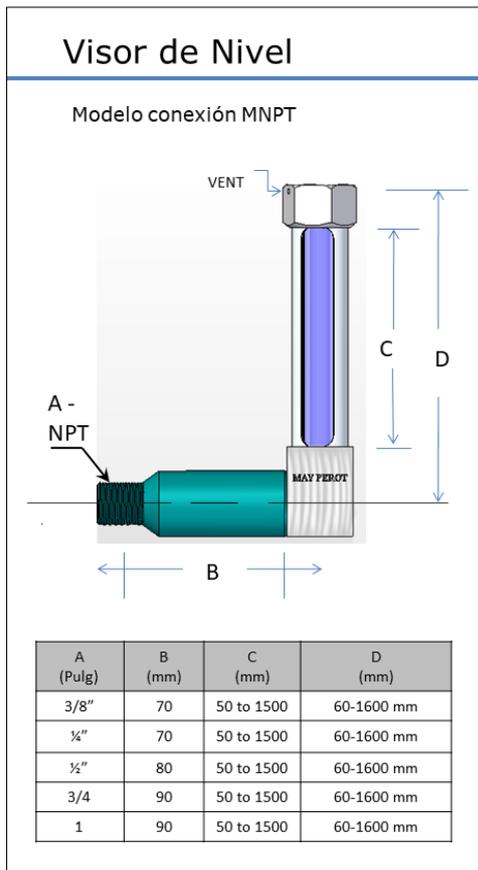
### 2.1. Fundamentos teóricos aplicados

El diseño e implementación de una interfaz humano-máquina (HMI) para la dosificación química en pozos petroleros permitirá cambiar la forma tradicional en la que se dosifica la química al fondo de los pozos petroleros, dejando en segundo plano instrumentos como la mirilla visual que podría estar sujeta a una mala interpretación del operador ya que involucra la interpretación humana al 100%, en lugar del método tradicional se adaptaran nuevos equipos electrónicos de alta precisión al proceso que permitirán incrementar la eficiencia y confiabilidad. La dosificación química desempeña un papel crítico en la industria del petróleo, ya que optimiza la producción y eficiencia operativa de los equipos electro sumergibles en los pozos petroleros, al controlar parámetros tales como la viscosidad del fluido, la corrosión y la formación de incrustaciones. El uso de una interface humano-máquina HMI adecuada, permitirá mejorar la capacidad de registro de variables en tiempo real en comparación a la medida usada actualmente que se realiza una vez cada semana, con esta propuesta esperamos un mejor desempeño en términos de respuesta a cambios del estado del pozo y a una mejora general de la productividad y rentabilidad de la operación. El desafío planteado en esta investigación es desarrollar una interfaz HMI, amigable, compatible con protocolos industriales, fácil de usar, que permita optimizar costos relacionados a fallas y tiempos operativos.

A continuación, se describen los elementos importantes del proceso de dosificación química en pozos petroleros con levantamiento artificial de petróleo.

**2.2.1 Visor de Nivel.** Dispone de una sección de vidrio denominada mirilla en la cual el operador verifica la presencia de fluido para luego realizar un cálculo de paso de gotas en un tiempo determinado, finalmente, correlaciona este resultado y encuentra el flujo de químico dosificado en 24 horas, ya que esta es una medida importante para el cálculo de la concentración adecuada en base a las propiedades fisicoquímicas del fluido, Figura 8. La cantidad de dosificación es determinada con datos de laboratorio y propiedades fisicoquímicas del fluido orientados en prevenir las diferentes problemáticas en los equipos instalados en el fondo del pozo (Mayperot, 2024).

**Figura 8**  
*Visor de Nivel con Mirilla.*



*Nota.* Recuperado de (Mayperot, 2024).

### 2.2.2 Bomba hidráulica pistón.

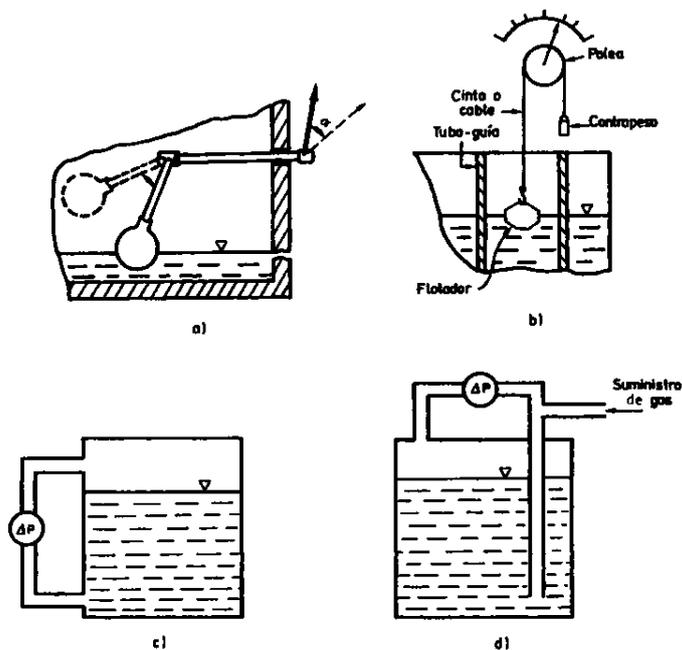
Una bomba hidráulica con pistón, utiliza la energía mecánica para impulsar un fluido hidráulico. Utiliza la energía del rotor de un motor eléctrico para mover los émbolos, impulsando el fluido de ciertas recamaras y generar presión hidráulica requerida en la descarga para que el fluido llegue a su destino. El funcionamiento de una bomba de pistón se resume en los siguientes pasos: Cámara de aspiración que permite que el producto ingrese a las recamaras de la bomba, Carrera de aspiración, en la cual el pistón se mueve hacia atrás creando vacío, Cierre de válvula de succión para evitar el retroceso del líquido, Carrera de compresión en la cual el pistón se mueve hacia adelante y comprime el producto químico, Dosificación en base a la selección manual de la carrera del pistón para finalmente tener un ciclo de repetición en base a la dosificación seleccionada (CERDA , 2023).

### 2.2.3 Sensores Nivel.

Existen diferentes formas de medir el nivel, una de ellas es ingresar una regleta y observar el nivel marcado en la misma, sin embargo esta es una forma tradicional no automatizada, otro

método de medir nivel es utilizando un flotador que cierra un circuito mecánico y envía un pulso eléctrico al llegar al nivel configurado, estos últimos son utilizados para detectar alarmas de bajo o alto nivel, las señales pueden ser enviadas a un controlador lógico programable en forma de un bit para posteriormente emitir una alarma, existen diferentes tipos de funcionamiento en los sensores de nivel con flotadores, uno de ellos es el convertir un desplazamiento en una fuerza o par y luego en ángulo de giro, también se pueden tener sensores que utilizan una polea y un contrapeso y la resultante del ángulo de giro se transforma en nivel. Otra alternativa ampliamente utilizada en superficies cerradas es el medir la diferencia de presiones o delta P, entre el fondo y la superficie, en la cual la altura es la resultante de la división del delta P sobre el producto de la densidad del líquido con la aceleración de la gravedad. Estos ejemplos se pueden apreciar en la Figura 9 (Pallas, 2004).

**Figura 9**  
*Sensores de nivel.*



a) Flotador-Desplazamiento b) Flotador-Polea, c) Presión diferencial d) Burbujeo y Presión diferencial.

*Nota.* Recuperado de (Pallas, 2004).

Existen también sensores de nivel ultrasónicos que utilizan ondas de sonido de alta frecuencia con el objetivo de medir la distancia de un líquido o sólido. El principio de trabajo se fundamenta en la emisión de pulsos de ultrasonido que se reflejan en una superficie finalmente determinan el tiempo que la onda tarda en retornar o eco para luego calcular la distancia entre el nivel y el receptor. El cálculo de la distancia es el resultado de la señal de velocidad por el

tiempo recorrido sobre 2 y la señal de velocidad se calcula con la velocidad de la luz sobre la raíz cuadrada de la constante dieléctrica (Creus, 2005).

#### 2.2.4 Sensores Presión.

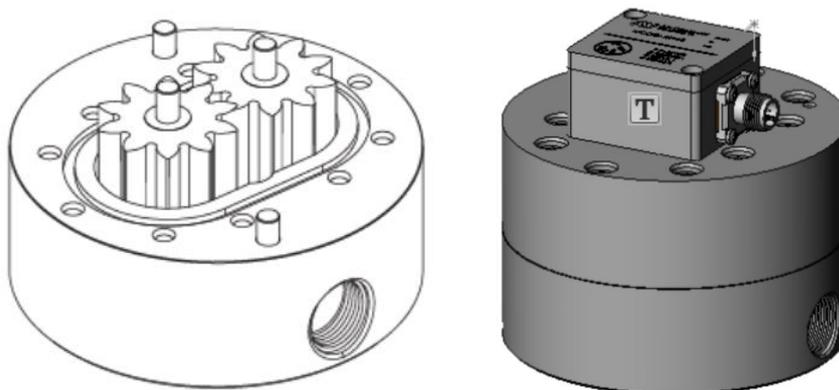
Una de las medidas más requeridas en control de procesos es la de presión, y se determina entre la fuerza y unidad de superficie, comparada con su efecto sobre un elemento elástico, los principios más utilizados son, el tubo Burdon que se basa en un tubo de sección circular aplanado al cual se le aplica un delta P entre el interior y exterior, otro principio usado es el de diafragma que consiste en una placa circular flexible que se deforma al aplicar presión, resultando en cambios de capacitancia o resistencia eléctrica (Pallas, 2004).

#### 2.2.5 Sensor de Flujo.

El flujo es considerado como el movimiento de un fluido por un conducto cerrado o abierto y de determina por la cantidad de volumen o peso que fluye por unidad de tiempo. La mayor parte de los caudalímetros se basan en una medida indirecta basadas en diferencias de presión generadas en elementos insertados en el conducto donde se desee medir (Pallas, 2004).

La empresa AW Lake señala que se puede utilizar el efecto Hall como principio de funcionamiento de los sensores de flujo basado en la aparición de una diferencia de potencial de forma transversal en un semiconductor o conductor en el que circula una corriente, como resultado de aplicar un campo magnético en sentido perpendicular. Estos sensores utilizan engranajes de desplazamiento positivo impulsados por el flujo, Figura 10, el sensor detecta el movimiento del engranaje, emitiendo un pulso de onda cada vez que un diente del engranaje pasa por el sensor, en el cual el tren de impulsos resultante es proporcional al caudal real, ofreciendo una medida precisa del fluido (Flowmeters, 2023).

**Figura 10**  
*Sensor de Flujo.*



*Nota.* Recuperado de (Flowmeters, 2023).

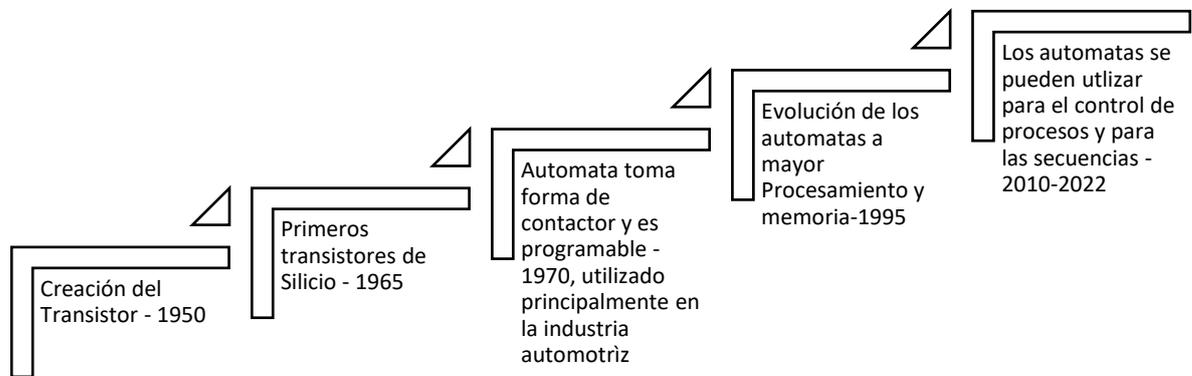
## 2.2.6 Controlador Lógico Programable

Un autómatas programable, es un dispositivo electrónico robusto construido para trabajar en ambientes industriales, que incluyen humedad, ruido, temperatura, vibración, polvo. Un controlador posee un procesador que comanda al sistema o proceso mediante un lenguaje de programación que se elabora en un software para posteriormente ser cargado desde un computador hacia el controlador. Interactúa con máquinas, señales de entrada y salida, tanto analógicas como digitales, es utilizado para automatizar procesos que involucran tareas que se repiten, o eliminar el contacto humano en tareas o procesos que involucran alto riesgo, la definición abarca años de innovación que se resumen en una reducción de dispositivos eléctricos, cableado, temporizadores, contactores, utilizados en sus inicios y que causaban grandes gastos económicos por la gran cantidad de recursos requeridos para dar solución a una tarea de automatización, el autómatas más utilizado en la industria se conoce como PLC o controlador lógico programable (Balcells & Romeral, 2009).

La Figura 11 muestra los sucesos significativos en la historia de los autómatas programables.

**Figura 11**

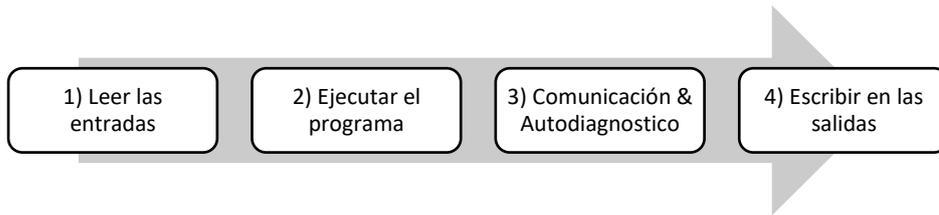
*Sucesos importantes de los autómatas programables.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de (Márquez, 2021)

Una vez alimentado o energizado, dispone de 2 estados 1(Run), o Ejecución, en este estado el autómatas permanece siempre ejecutando o corriendo la programación hasta perder energía o pasar al estado de parada, esta ejecución continua y cíclica se conoce como ciclo de escaneo y consta de 4 pasos, ver Figura 12, entre ellos leer las entradas, ejecutar el programa, Comunicación & Autodiagnóstico, escribir en las salidas, 2 (Stop), o parada, en este estado ya no tenemos la ejecución de la programación (Monzó, 2014) .

**Figura 12**  
Ciclo de escaneo del PLC.

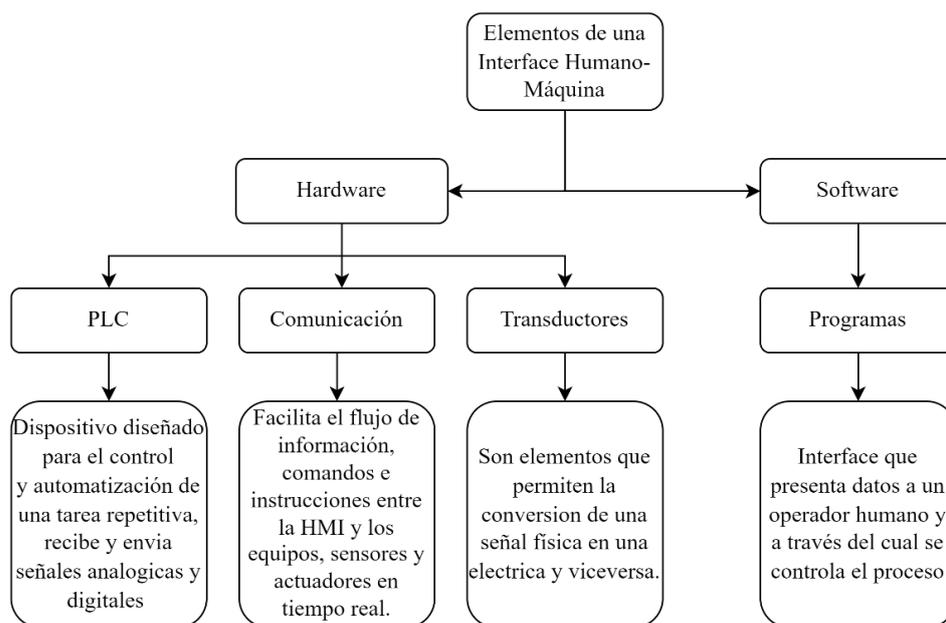


*Nota.* Elaboración propia a partir de (Monzó, 2014)

### 2.2.7 Interface HMI.

Una interfaz humano-máquina (HMI) como un sistema que permite la interacción entre los dispositivos industriales o máquinas y humanos. Algunas características importantes de una interfaz HMI son: Mostrar la información y datos de un proceso industrial en tiempo real a través de pantallas, paneles de control permitiendo una fácil interacción con diferentes variables del nivel de campo. Además, permite monitorear tendencias, condiciones, alarmas y tomar acción para prevenir fallas. Dependiendo del software, es posible interactuar con botones, indicadores virtuales sin necesidad de exponerse a riesgos. Permite el desarrollo de interfaces gráficas intuitivas, amigables para facilitar la interacción con el operador. Las interfaces HMI son ampliamente utilizadas en la automatización industrial ya que permiten centralizar el control, operación y visualización de diferentes equipos, suministrando una supervisión eficiente (Guccione, 2016).

**Figura 13**  
Mapa Conceptual, Arquitectura de un HMI.



*Nota.* Elaboración propia a partir de (Guccione, 2016)

## 2.2. Descripción de la propuesta

**a. Descripción.-** La evolución tecnológica a nivel mundial ha tenido significativos avances, con varios acontecimientos sustanciales para las industrias que han marcado el rumbo de la producción y la automatización, empezando por la era de producción mecanizada, seguido por la segunda revolución industrial denominada era de la ciencia y producción en masa, seguida de la tercera revolución industrial o era digital, por último estamos viviendo e incursionando a la 4ta revolución industrial también llamada industria 4.0 en la que predomina la automatización y digitalización de procesos buscando conseguir fábricas inteligentes (Ynzunza, Izar, Bocarando, Pereyra, & Osorio, 2017).

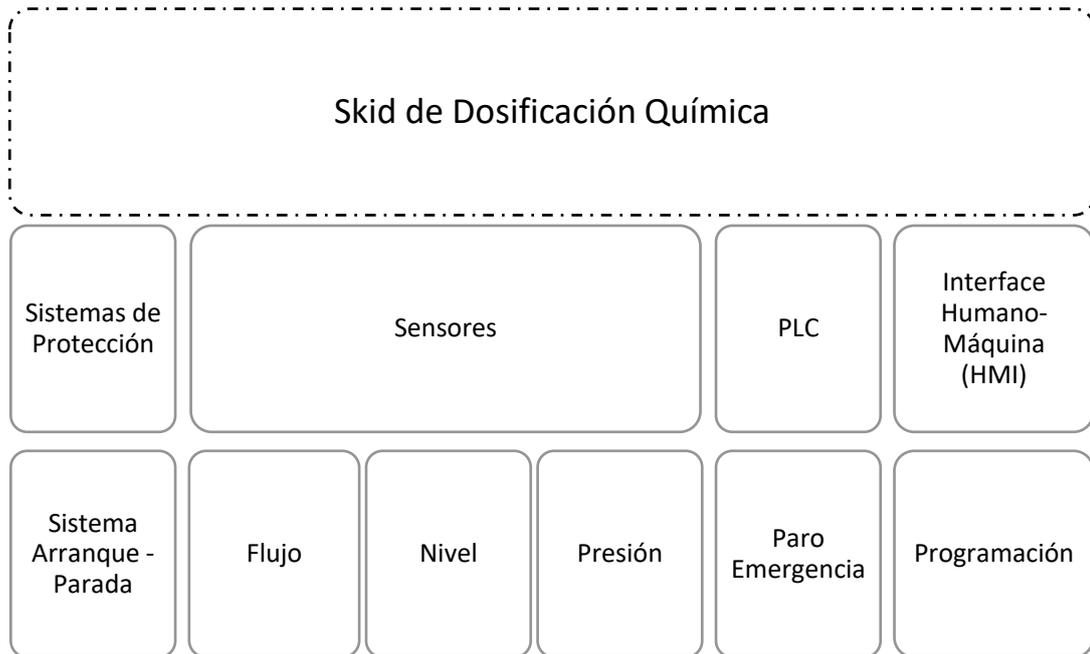
Adaptándonos a los continuos cambios y avances tecnológicos, en el actual trabajo se plantea el desarrollo de una interface humano-máquina para el proceso de dosificación química en los pozos petroleros con levantamiento artificial con bombeo electrosumergible, buscando cambiar la forma tradicional en la cual se dosifica la química. El presente proyecto incluye la implementación de un skid de dosificación de química que tendrá sensores de Flujo, Nivel, Presión, una Interface humano-máquina, visualización de tendencias en tiempo real, configuración de alarmas, posibilidad de almacenamiento de la información, configuración de mantenimiento programado, desviaciones en la dosificación, recupero de información luego de paradas por fallas de generación, elementos de protección ante sobre voltajes y mecanismo de arranque y parada de la bomba dosificadora.

### Estructura general

Los principales elementos que componen el prototipo de dosificación con interface humano-máquina para sistemas de levantamiento artificial de petróleo se enlistan a continuación y se detallan en el organizador gráfico de la Figura 14:

- Skid de dosificación química
- Tanque de almacenamiento de producto químico.
- Sistemas de protección
- Sistema arranque, parada, paro emergencia.
- Sensor de flujo
- Sensor de nivel
- Sensor de presión
- Controlador lógico programable
- Interface humano-máquina (HMI)
- Programación de PLC para acondicionamiento de señales y algoritmos

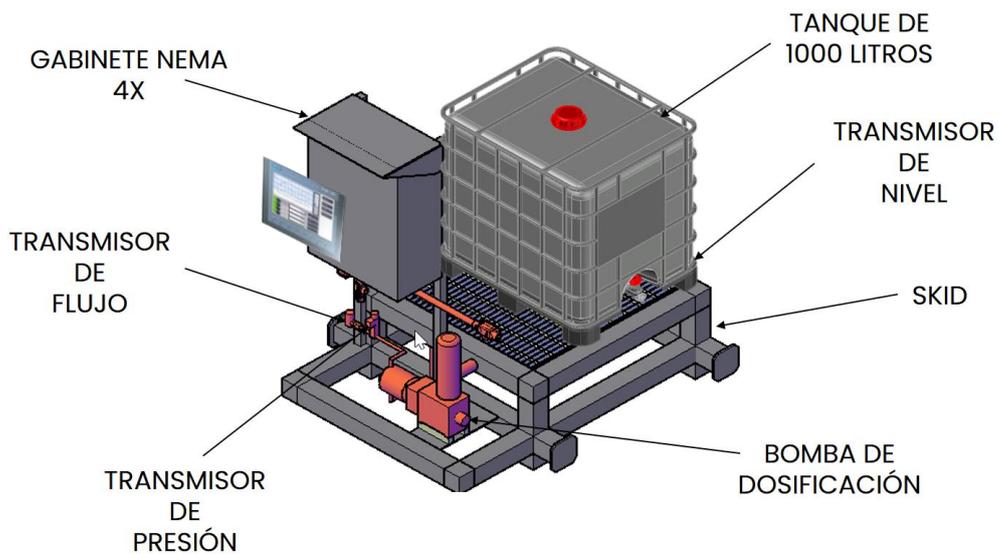
**Figura 14**  
Organizador gráfico del prototipo de dosificación automatizado.



Nota. Elaboración propia.

- b. Explicación del aporte.** - Se detalla el funcionamiento y empleo de cada componente de la interface humano-máquina para dosificación de química en sistemas de levantamiento artificial de petróleo además se describe gráficamente la solución planteada en la Figura 15.

**Figura 15**  
Componentes del skid de químico automatizado.



Nota. Elaboración propia.

## Skid de Dosificación Química.

### Especificaciones:

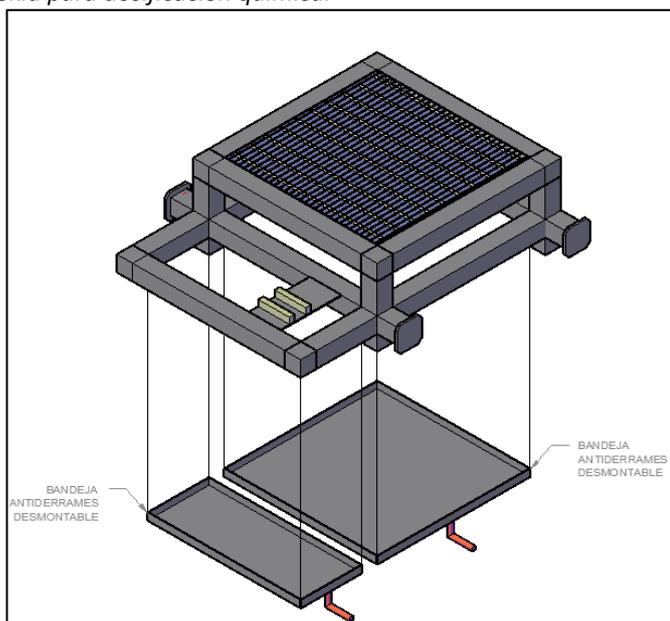
SKID construido con tubo cuadrado de acero de 4" con capacidad para soportar 2.0 toneladas. Es parte de la propuesta ya que es una opción transportable y de fácil conexión en el entorno actual, una vez ensamblado el skid en conjunto con los demás componentes, únicamente requiere una conexión de línea capilar en la descarga de la bomba y la alimentación eléctrica. En la Figura 16 se realizó un gráfico 3D del skid propuesto.

### Características constructivas:

- Acero limpiado por sanblasting.
- Pintura tricapa.
- Presión de desprendimiento de la pintura sobrepasa los 750 PSI.
- Bandejas de recolección de derrames.

**Figura 16**

*Skid para dosificación química.*



*Nota.* Elaboración propia.

### Bomba Dosificadora.

La bomba de pistón Milton Roy fue seleccionada en base a las necesidades del proceso, capacidad de dosificar tasas de flujo que van desde 0,2 galones por día hasta 100 galones por día, construcción para soportar fluidos corrosivos, capacidad de escalabilidad a control por variador de frecuencia, alta precisión y confiabilidad (MiltonRoy, 2024).

### Especificaciones:

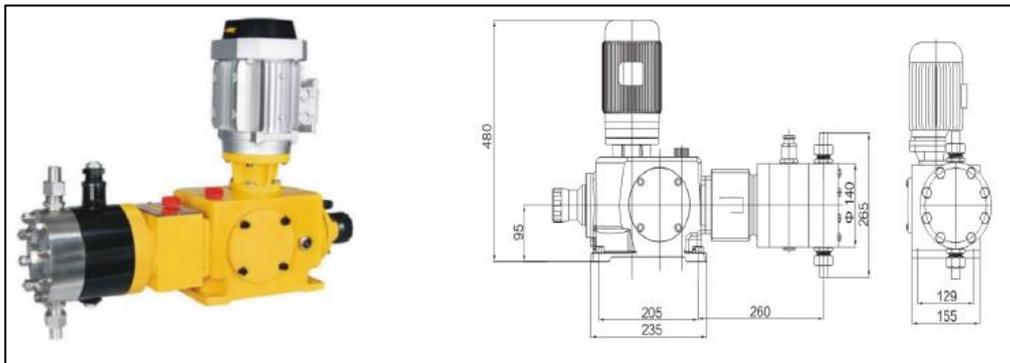
Bomba de Pistón para dosificación de química en pozos con levantamiento artificial de petróleo con bombas electro-sumergibles:

- Flujo: 0-100 gpd
- Presión de trabajo: 0-2000 PSI
- Motor explosión proof
- Alimentación 220 trifásico con posibilidad de control por VSD
- IP 54
- Principio de funcionamiento hidráulico
- Regulación de flujo a través de perilla o con variador de velocidad.

A continuación, se muestra en la Figura 17, las características técnicas y dimensiones de la bomba seleccionada.

**Figura 17**

*Bomba de pistón para dosificación química.*



*Nota.* Recuperado de (MiltonRoy, 2024)

### Sensor de Flujo

El sensor seleccionado es el AWJVS de efecto Hall por sus altos niveles de precisión. Lo que garantiza una correcta medición en el proceso de dosificación de química en pozos petroleros, además, este sensor puede ser construido en acero inoxidable para trabajo con química corrosiva. Existen muy pocas opciones en el mercado ya que las tasas de medición son muy pequeñas con un rango mínimo de medición requerido de 0.2 galones por día. La efectividad, precisión lo vuelven una opción ideal para mejorar la precisión y calidad en el proceso (Flowmeters, 2023).

**Especificaciones:**

- Alimentación: 5-26 VDC
- Salida: Pulsos
- Utilizable para fluidos medios corrosivos
- Presión máxima: 500 – 5000 Psi
- Flujo de medición: 0.5-150 ml/min, conexión: G1/8

En la Figura 18 se puede apreciar la imagen de un sensor modelo AWJVS de efecto Hall, presión de trabajo 5000Psi, salida a pulsos, la señal será recibida por un controlador lógico programable para su acondicionamiento.

**Figura 18**

*Sensor de Flujo.*



*Nota.* Recuperado de (Flowmeters, 2023)

**Sensor Presión.**

El sensor de nivel y sensor de presión seleccionado, Figura 19, basados en delta P, se lo seleccionó en base a costos, facilidad de instalación, precisión en la medición para ambientes cerrados, límites de presión acorde a la aplicación (Flowmeters, 2023).

**Especificaciones:**

- Alimentación: 5-26 VDC
- Salida: 4-20 mA
- Utilizable para fluidos corrosivos
- Presión: 0-2000 Psi

**Figura 19**  
*Sensor de Presión-Nivel.*

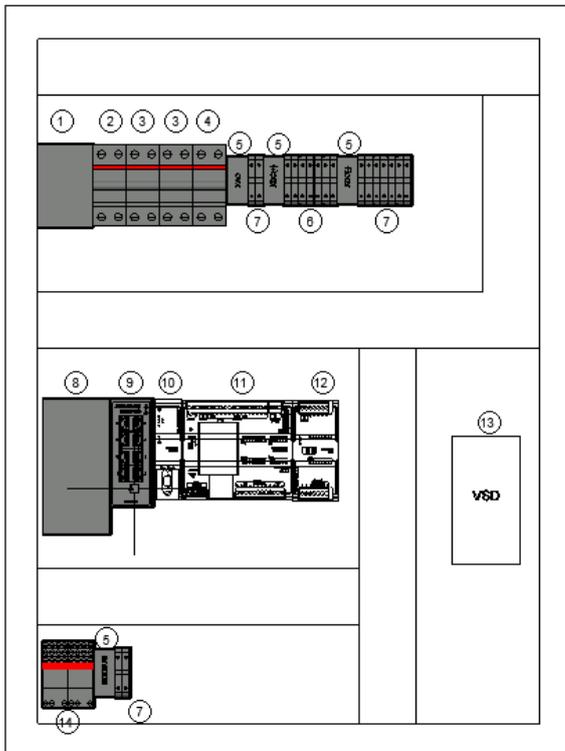


Nota. Recuperado de (Flowmeters, 2023)

**Tablero de Control**

Se propone la construcción de un gabinete nema 4x mostrado en la Figura 20 para uso en exteriores construido en acero inoxidable 304. Ítems descritos en la Tabla 2.

**Figura 20**  
*Elementos del tablero de control.*



Nota. Elaboración propia.

**Tabla 2***Equipos internos en panel de control.*

Item	Cantidad	Componentes :
1	1	Supresor de trascientos (L-N)
2	1	Breaker riel din marca ABB, 2P, 10 Amperios
3	1	Breaker riel din marca ABB, 2P, 4 Amperios
4	1	Breaker riel din marca ABB, 2P, 2 Amperios
5	1	Repartidores de grupo
6	1	Borneras porta-fusible marca Allen Bradley
7	1	Borneras de paso
8	1	Fuente de Alimentación 220-110 VAC/ 24 VDC
9	1	Switch de comunicaciones
10	1	Módulo de comunicaciones Modbus RS485
11	1	PLC S7-120
12	1	Módulo de salidas analógicas (4-20 mA)
13	1	Variador de Velocidad marca delta
14	1	Relés auxiliares 24 VDC
15	1	KTP 900 Basic

*Nota.* Elaboración Propia.

**Selección del autómatas programable.** Basados en las necesidades del proceso de dosificación de química, a continuación, se enumeran varios criterios que fueron utilizados para la selección en el desarrollo del presente proyecto: Ciclo de escaneo y velocidad del procesador acorde al proceso, número de entradas y salidas acorde a las necesidades, el PLC S7-1200 cuenta con entradas embebidas, y capacidad de expansión. Dispone posibilidad de procesar un tren de pulsos, de alta frecuencia para lectura del sensor de flujo, dispone capacidad de expansión de memoria, capacidad de conectividad con diferentes protocolos de la industria ya sea Modbus, Profinet, Profibus, es importante el protocolo abierto que permite adaptación, soporte de la marca, calidad, confiabilidad y buena relación costo beneficio. El controlador seleccionado para esta aplicación fue el PLC S7-1200 debido a su confiabilidad, flexibilidad y capacidad de integración. Su robustez ofrece un funcionamiento estable en entornos industriales, mientras que su versatilidad permite adaptarse a diferentes requerimientos y procesos que buscan automatizar de tareas. Además, su capacidad de comunicación y programación facilita la integración con la interfaz humano-máquina (HMI) para una supervisión eficiente del proceso de dosificación química es sistemas de levantamiento artificial de petróleo (Balcells & Romeral, 2009).

Las características generales del PLC seleccionado se detallan en la Figura 21:

**Figura 21**

*Controlador Simatic S7-1200.*



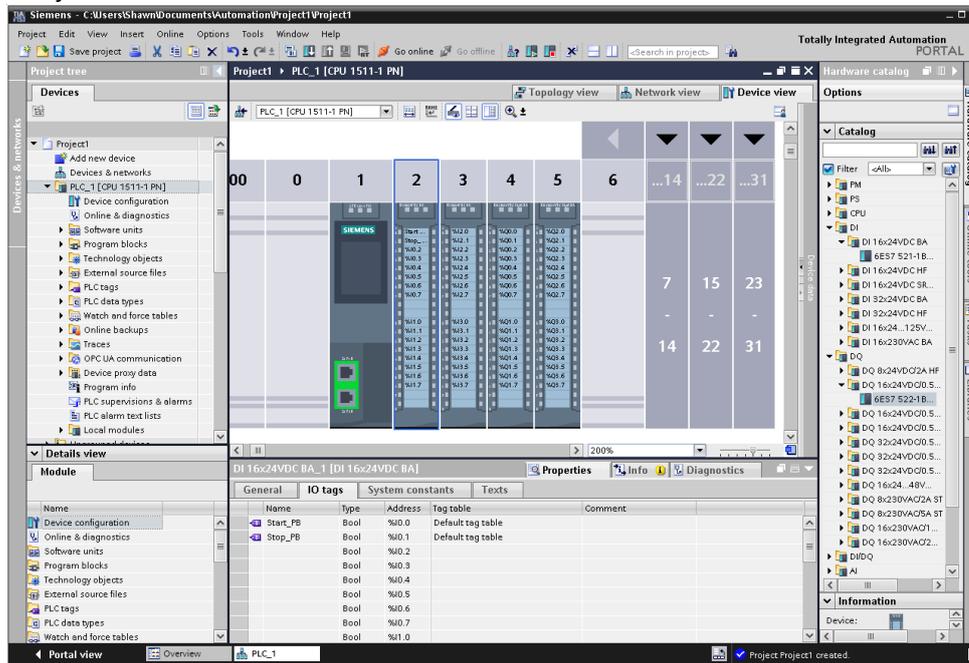
*Nota.* Recuperado de (Siemens, 2024).

### **Tia Portal (Totally-Integrated-Automation-Portal).**

TIA Portal de las siglas en ingles T: Totally I: Integrated A: Automation Portal, es un software desarrollado por Siemens y ampliamente utilizado en ingeniería y en el ámbito industrial, este software, permite la programación, configuración y diagnóstico de dispositivos de automatización, como sistemas de supervisión de datos, controladores lógicos programables, interfaces humano-maquina, servomotores, variadores de frecuencia. El software TIA Portal se seleccionó para el desarrollo del presente proyecto debido a varias razones. En primer lugar, ofrece una plataforma de desarrollo integral que permite la programación, configuración y visualización de sistemas de automatización y ofrece la opción de lenguaje de programación o LD- lenguaje con diagrama de Escalera o Ladder usado en sistemas SCADA de la industria petrolera lo cual permitirá una escalabilidad sencilla. Esto simplifica considerablemente el proceso de desarrollo al proporcionar herramientas integradas para todas las fases del ciclo de vida. Además, TIA Portal es un software compatible con el PLC S7-1200 seleccionado para este proyecto, lo que facilita la programación y la integración en el sistema de dosificación química. Su interfaz amigable facilita la creación de interfaces humano-máquina (HMI) personalizadas para la supervisión de parámetros del proceso de dosificación de química en pozos petroleros con levantamiento artificial de petróleo (Fernández, 2021).

La Figura 22 muestra una captura de la interface del software TIA Portal utilizada en esta aplicación.

**Figura 22**  
*Interface TIA Portal.*



*Nota.* Captura de interface TIA Portal.

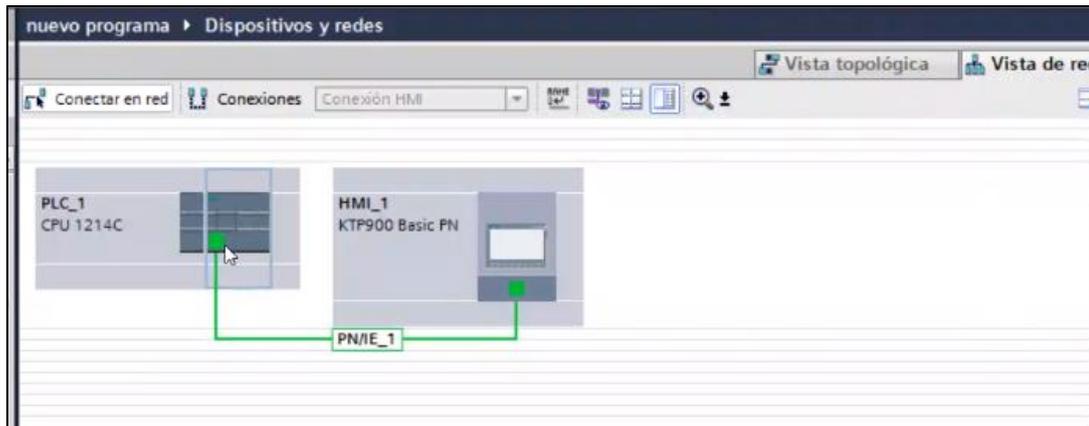
### Pantalla SIMATIC KTP900

Se seleccionó la pantalla SIMATIC KTP900 Basic de 9 pulgadas para el presente proyecto tomando varias consideraciones importantes. Empezando por su tamaño de 9 pulgadas que ofrece una interfaz amplia, fácil de interactuar, visualizar para el usuario, permitiendo una interacción adecuada con el sistema de dosificación química. Además, la pantalla SIMATIC KTP900 Basic dispone de una pantalla táctil intuitiva que facilita el acceso y navegación durante la configuración de parámetros, lo que facilita el proceso supervisión del sistema de dosificación de química. Su diseño ofrece un rendimiento confiable para trabajo en entornos difíciles con lluvia, sol, viento, generalmente condiciones del entorno de dosificación química en pozos petroleros.

Además, es compatible con el software TIA portal , permitiendo configurar una red Profinet entre el PLC S7-1200, ejemplo mostrado en la Figura 23, así como el desarrollo de la interface para el usuario (Siemens, 2024).

**Figura 23**

*Ejemplo de configuración de conexión de la pantalla KTP y PLC.*

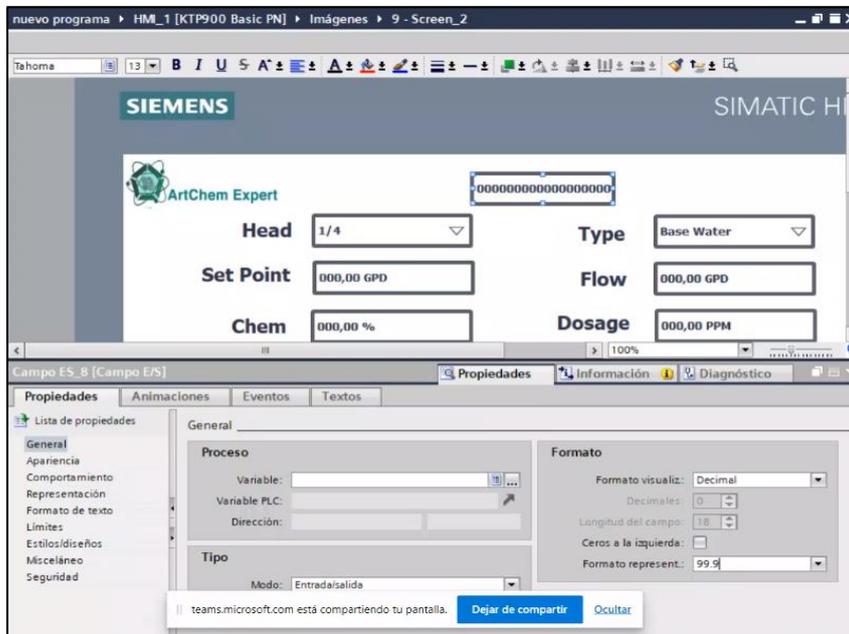


*Nota.* Configuración comunicación en TIA Portal.

En la Figura 24 se puede apreciar parte del desarrollo de la interface humano-maquina implementada en el software TIA portal de Siemens. Esta interfaz, desarrollada para proveer la interacción entre las máquinas y los usuarios, presenta una serie de elementos visuales y funcionales cuidadosamente diseñados para optimizar la experiencia del usuario.

**Figura 24**

*Diseño de la Interface humano-máquina.*



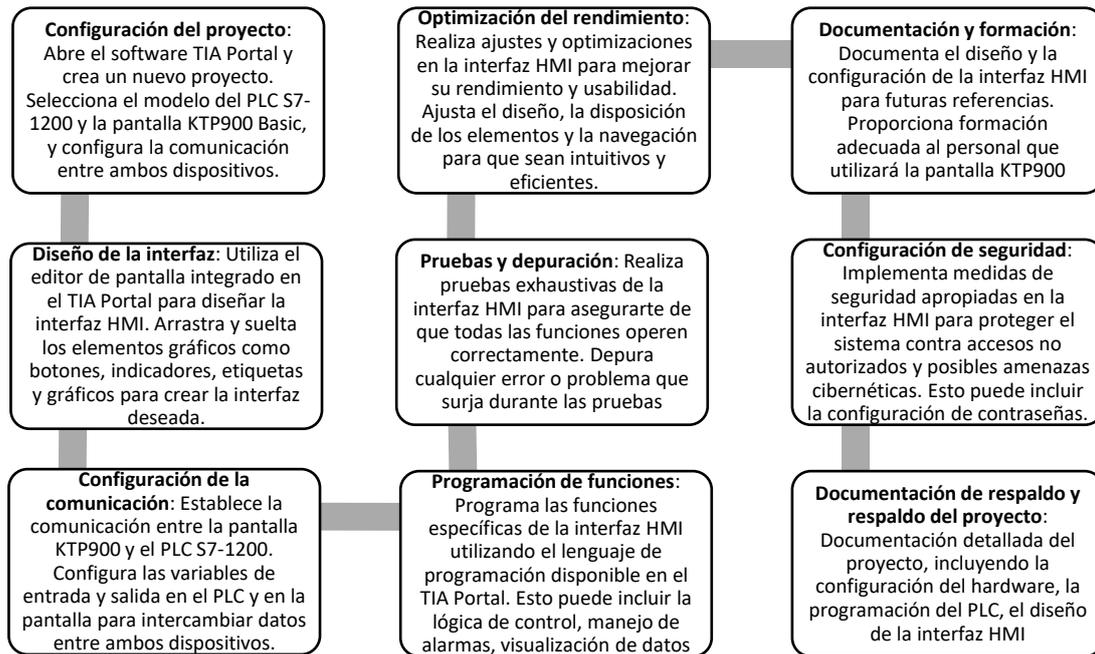
*Nota.* Diseño interface humano-máquina en TIA Portal.

### **Diagrama de Flujo para desarrollo de interface HMI**

En la Figura 25, se detallan los pasos para elaborar una interfaz HMI en una pantalla SIMATIC KTP900 con un PLC S7-1200:

**Figura 25**

*Pasos para elaborar una interface humano-máquina.*



*Nota.* Elaboración propia.

- c. **Estrategias y/o técnicas.** - Para la construcción de la interfaz humano-máquina para la dosificación de química en pozos petroleros con levantamiento artificial de petróleo, se emplearon las siguientes estrategias y técnicas:

#### **Integración de sensores:**

Adaptación a los cambios tecnológicos con la incorporación de diferentes dispositivos electrónicos que permitan mejorar la eficiencia en el sistema de dosificación química en pozos petroleros. Se incorporó en el prototipo un sensor de flujo por efecto Hall para medir con precisión el caudal de químicos reemplazando la forma tradicional de medición con un visor de mirilla, además se instaló un sensor de presión ubicado en la salida de la bomba de dosificación de química con el objetivo de detectar taponamientos en el tubo capilar que transporta el químico hasta el fondo del pozo, buscando mantener la inyección continua y prevenir fallas. Se implementó un sensor de nivel en el tanque de almacenamiento de químicos para poder verificar el nivel bajo y emitir una alarma de reposición de químico.

#### **Programación del PLC:**

Se incluyeron diferentes algoritmos buscando incrementar la confiabilidad del sistema, estos algoritmos fueron elaborados basados en las necesidades del cliente final. Se desarrolló un algoritmo para monitorear el tiempo de operación de la bomba de pistón y

calcular la fecha de mantenimiento preventivo, se implementó un algoritmo de detección de fallas basado en desviaciones del flujo nominal, se programaron rutinas para la adquisición de los datos de los sensores del proceso en tiempo real, finalmente se incluyó código de programación para verificar si la reposición de químico fue adecuada ya que al ser un producto costoso pueden existir diferentes desviaciones.

#### **Interfaz de usuario:**

Se diseñó una interfaz gráfica intuitiva con diferentes representaciones visuales del proceso, tendencias del flujo, configuración de alarmas, botones de arranque y parada de la bomba de dosificación, se incorporaron alarmas visuales para alertar sobre condiciones anómalas.

#### **Comunicación y conectividad:**

Se seleccionó un PLC que permitirá interconectarse a diferentes dispositivos mediante protocolo muy utilizado en la industria de extracción de petróleo. El protocolo Modbus RS485 permitirá conectarse como esclavo a sistemas SCADA para interactuar y enviar la información. Además, la fácil configuración entre PLC y pantalla mediante protocolo Profinet es una ventaja. Se configuró la conectividad de red para permitir el acceso remoto y la supervisión desde estaciones centralizadas.

#### **Calibración:**

Se llevó a cabo un proceso de calibración precisa del sensor de flujo por efecto Hall en este sentido, se realizaron pruebas comparativas entre las lecturas del sensor y las mediciones manuales del operador para poder validar la efectividad del sistema. Se validó la alta precisión del sensor de flujo en comparación con los métodos manuales.

Estas estrategias y técnicas permitieron construir una interfaz HMI robusta, precisa y fácil de usar, que optimiza la dosificación química, reduce los costos asociados en los pozos petroleros con levantamiento artificial mejorando la eficiencia operativa.

### **2.3. Validación de la propuesta**

A continuación, procederemos a validar el presente trabajo mediante la evaluación por parte de 4 especialistas en el área de la electrónica, Tabla 3. Para ello, utilizaremos un conjunto de criterios de evaluación específicos. Posteriormente, se presentarán los resultados obtenidos en este proceso de validación

**Criterios de Evaluación:**

**Tabla 3**  
Descripción perfil validadores.

Nombre y Apellido	Años Experiencia	Titulación Académica	Cargo
Fernando Zapata	6	Ingeniero Electrónico	Soporte Técnico
Chrystiam Guzman	18	Ingeniero Electrónico	Ingeniería
Juan Montesdeoca	19	Ingeniero Electromecánico	Ingeniería
Santiago Salazar	11	Ingeniero Electromecánico	Ingeniería

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 4 se detallan los criterios de evaluación con su respectiva descripción para posteriormente proceder a generar el cuestionario para los especialistas en cada uno de los campos descritos.

**Tabla 4**  
Criterios de evaluación del proyecto.

Criterio	Descripción
Impacto	Evalúa la capacidad para generar valor público en la industria petrolera.
Aplicabilidad	Considera la viabilidad de aplicar los contenidos de la propuesta en entornos reales de producción petrolera.
Conceptualización	Verifica que los elementos de la propuesta estén fundamentados en conceptos relevantes de la gestión de procesos industriales.
Actualidad	Evalúa si se incluyen avances tecnológicos y garantiza su relevancia.
Calidad Técnica	Evalúa la calidad cualitativa del contenido de la propuesta, considerando la precisión, coherencia y rigor técnico en su elaboración y desarrollo.
Factibilidad	Evalúa el nivel de aplicabilidad del modelo propuesto en las empresas petroleras, considerando aspectos logísticos, económicos y operativos.
Pertinencia	Verifica si el contenido es pertinentes y adecuado para abordar eficazmente el problema de la dosificación química en pozos petroleros, ofreciendo soluciones relevantes y efectivas.

Nota. Elaboración Propia a partir de (Miranda, 2022).

## Escala de Evaluación

La escala de evaluación planteada para el presente análisis es una escala de Likert, esta escala es un tipo de medición utilizada en cuestionarios o encuestas buscando medir actitudes, percepciones de las personas en referencia a un determinado tema (Faye, 2020).

Se plantean cinco puntos, con respuestas cerradas, en donde los participantes pueden indicar su grado de acuerdo o desacuerdo con respecto a cada criterio utilizando las siguientes opciones:

1. En Total Desacuerdo
2. En Desacuerdo
3. Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo
4. De Acuerdo
5. Totalmente de Acuerdo

Se elabora un cuestionario, Figura 26, con método de respuestas online por factibilidad de acceder al desarrollo de los expertos evaluadores, a continuación, se muestra la imagen del cuestionario propuesto y los resultados obtenidos.

**Figura 26**

*Cuestionario de validación del proyecto.*

Seleccione según la importancia y representatividad del proyecto planteado: Diseño e implementación de una interfaz humano-máquina para optimizar la dosificación química en los pozos con levantamiento artificial de petróleo.

	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente de Acuerdo
Impacto	●				
Aplicabilidad	●				
Conceptualización	●				
Actualidad	●				
Calidad Técnica	●				
Factibilidad	●				
Pertinencia	●				

*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

La tabla 5, y desde la Figura 28 a la Figura 34, muestran los resultados del cuestionario enviado y revisado por los evaluadores, presentando un resumen de los resultados porcentuales del cuestionario de validación del proyecto, resultados de puntaje por pregunta del cuestionario

de validación del proyecto y los resultados porcentuales a las preguntas planteadas en base a los criterios de la Tabla 4.

Todos los evaluadores coinciden que el presente proyecto es un tema de alta calidad técnica, y están totalmente de acuerdo que el tema involucra niveles adecuados de viabilidad para la elaboración.

**Tabla 5**  
Resultados porcentuales del cuestionario de validación del proyecto.

Statement	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente de Acuerdo	Overall
Impacto	0 0%	0 0%	1 25%	1 25%	2 50%	4 100%
Aplicabilidad	0 0%	0 0%	0 0%	1 25%	3 75%	4 100%
Conceptualización	0 0%	0 0%	0 0%	1 25%	3 75%	4 100%
Actualidad	0 0%	0 0%	0 0%	1 25%	3 75%	4 100%
Calidad Técnica	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	4 100%	4 100%
Factibilidad	0 0%	0 0%	0 0%	3 75%	1 25%	4 100%
Pertinencia	0 0%	0 0%	0 0%	3 75%	1 25%	4 100%

*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

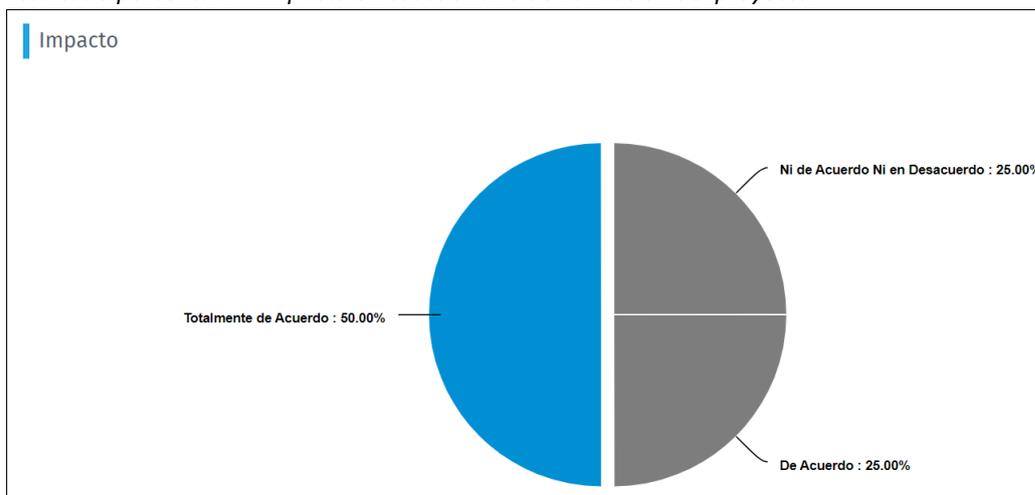
**Figura 27**  
Resultados puntaje por pregunta del cuestionario de validación del proyecto.

Pregunta	Recuento	Puntuación	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente de Acuerdo
Impacto	4	4,25					
Aplicabilidad	4	4,75					
Conceptualización	4	4,75					
Actualidad	4	4,75					
Calidad Técnica	4	5					
Factibilidad	4	4,25					
Pertinencia	4	4,25					
<b>Promedio</b>		<b>4,57</b>					

*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

**Figura 28**

*Resultado porcentual – Impacto en cuestionario de validación del proyecto.*

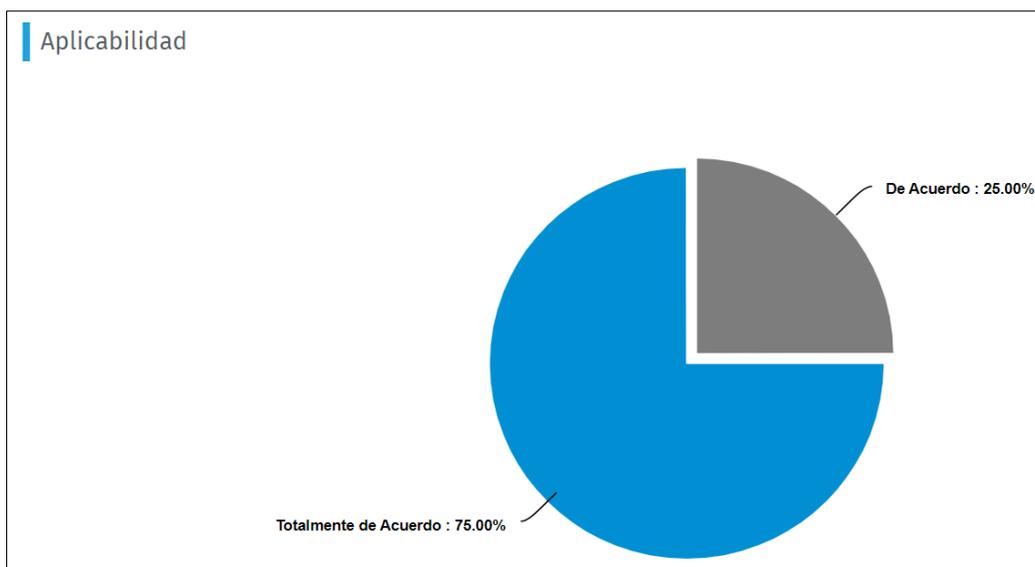


*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

Los resultados de la Figura 28 determinan que el 50% de los encuestados coinciden que el proyecto propuesto es de impacto, lo cual representa un respaldo significativo para su implementación en la industria petrolera. Un 25% adicional manifestó estar de acuerdo, aunque no de forma total. Esto sugiere que, si bien ven beneficios en el proyecto, podrían tener algunas reservas o áreas de preocupación. Por otro lado, el 25% restante no se mostró ni de acuerdo ni en desacuerdo, adoptando una posición neutral.

**Figura 29**

*Resultado porcentual – Aplicabilidad en cuestionario de validación del proyecto.*

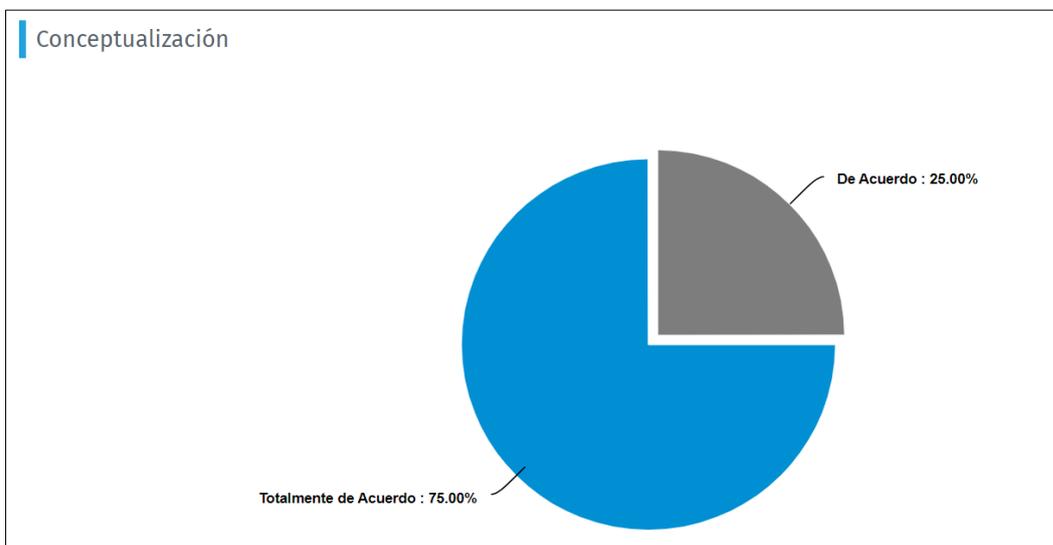


*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

Según la Figura 29, el 75% de los encuestados están totalmente de acuerdo con la aplicabilidad del proyecto propuesto. Este es un porcentaje muy alto y representativo que indica un fuerte respaldo y percepción positiva sobre la viabilidad de implementar el proyecto en la práctica. Adicionalmente, un 25% adicional manifestó estar de acuerdo, aunque no de forma total, con la aplicabilidad del proyecto. En conjunto, se observa un consenso prácticamente unánime, con el 100% de los encuestados mostrándose a favor, en diferentes grados, de la aplicabilidad del proyecto en cuestión.

**Figura 30**

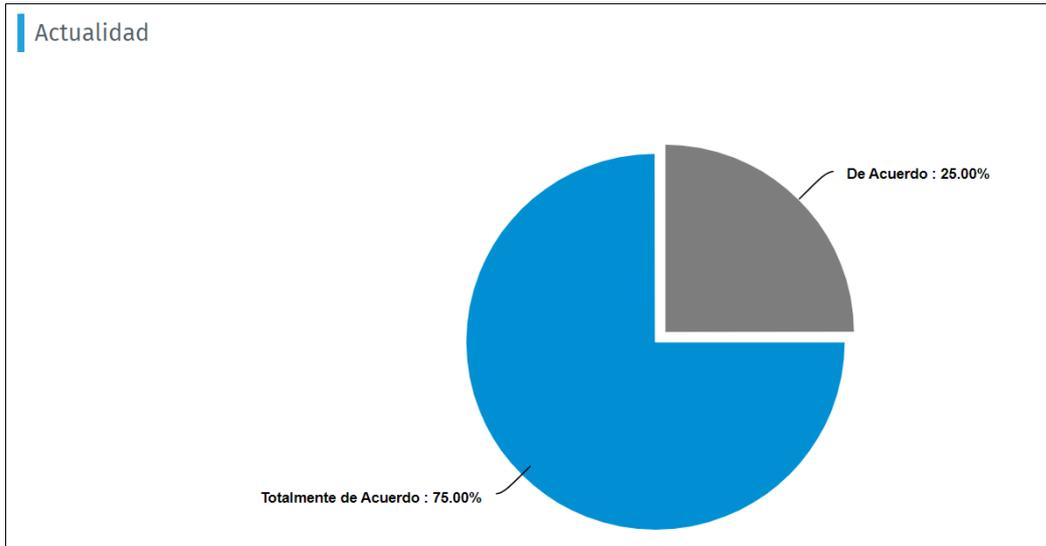
*Resultado porcentual – Conceptualización en cuestionario de validación del proyecto.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

La Figura 30 muestra que el 75% de los encuestados están totalmente de acuerdo con la conceptualización del proyecto propuesto. Este porcentaje mayoritario indica un alto nivel de aceptación y una percepción positiva sobre el planteamiento general del proyecto. Adicionalmente, un 25% adicional manifestó estar de acuerdo, aunque no de forma total, con la conceptualización presentada. Ambos resultados son positivos para el desarrollo.

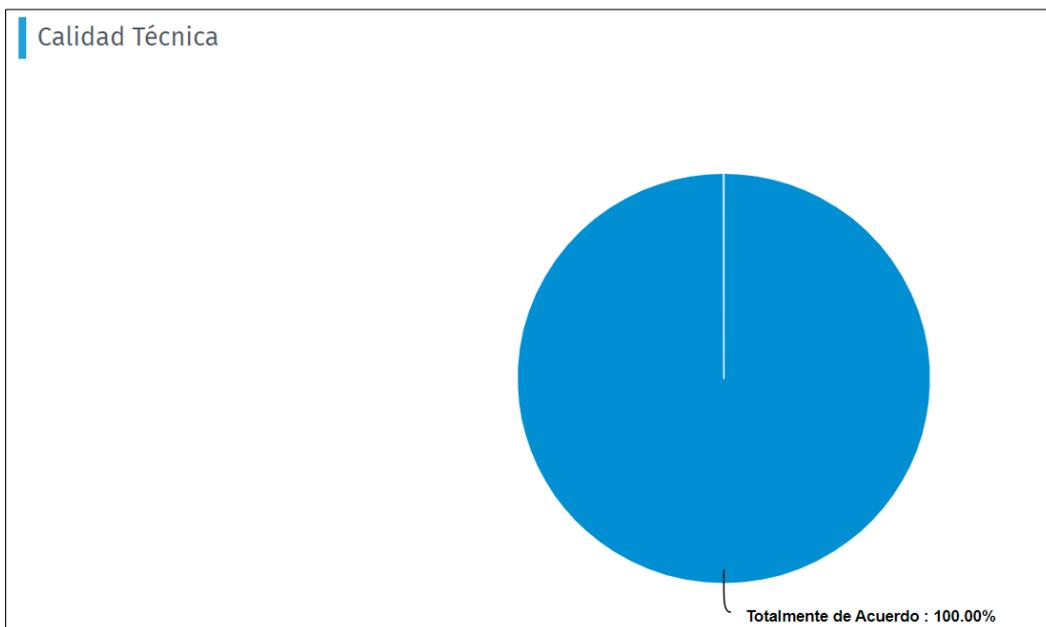
**Figura 31**  
*Resultado porcentual – Actualidad en cuestionario de validación del proyecto.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

La Figura 31 muestra que el 75% de los encuestados están totalmente de acuerdo que el proyecto propuesto es un tema de actualidad. Este porcentaje mayoritario indica una percepción positiva. Adicionalmente, un 25% manifestó estar de acuerdo, aunque no de forma total, con la actualidad del proyecto. En conjunto, se observa un resultado que impulsa la implementación del proyecto.

**Figura 32**  
*Resultado porcentual – Calidad Técnica en cuestionario de validación del proyecto.*

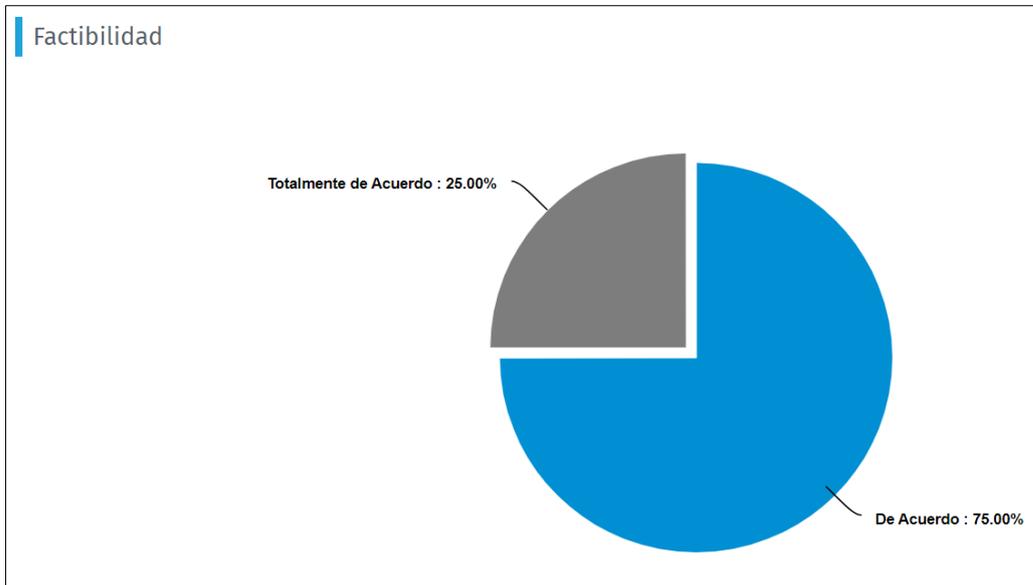


*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

La Figura 32 muestra que todos los encuestados coinciden que el presente proyecto tiene una calidad técnica adecuada para el desarrollo en la industria petrolera.

**Figura 33**

*Resultado porcentual – Factibilidad en cuestionario de validación del proyecto.*

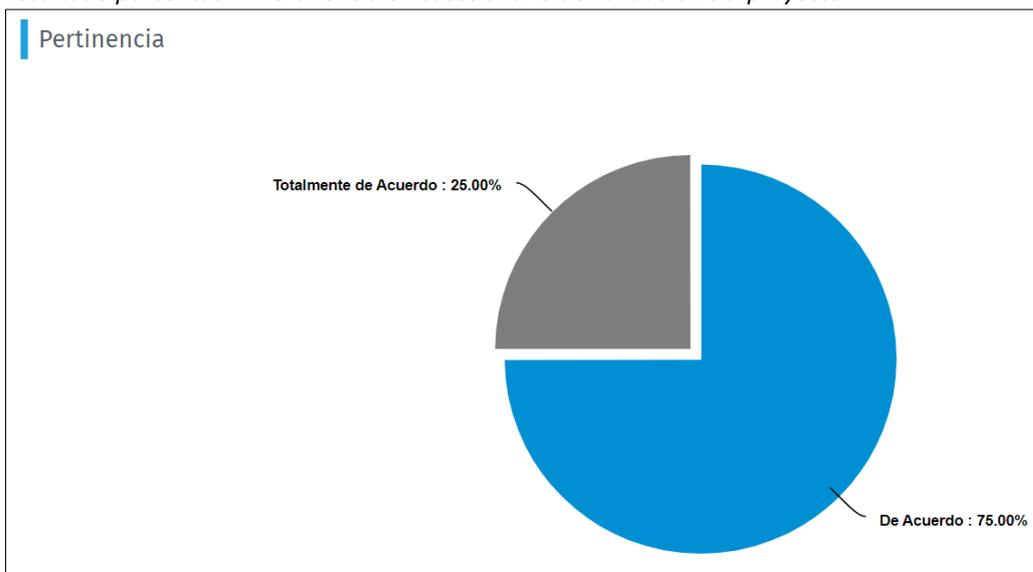


*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

La figura 34 muestra que la mayoría de los encuestados, un 75%, manifestó estar de acuerdo con la factibilidad del proyecto propuesto mientras que el 25% está totalmente de acuerdo, ambos son resultados positivos para la implementación del proyecto en la industria petrolera.

**Figura 34**

*Resultado porcentual – Pertinencia en cuestionario de validación del proyecto.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de (QuestionPro, 2024).

Finalmente, la Figura 34 muestra que el 75% de los encuestados están de acuerdo que el presente proyecto tiene pertinencia o coherencia mientras que el 25% están totalmente de acuerdo que es un proyecto coherente para el desarrollo en el ámbito petrolero. Ambos resultados validan que es un proyecto viable, factible y coherente.

En resumen, todos los resultados previos son alentadores y demuestran un respaldo en el desarrollo del presente proyecto lo cual es un factor clave para proceder con la etapa de desarrollo.

## 2.4. Matriz de articulación de la propuesta

La Tabla 6, detalla una matriz que consolida la vinculación del resultado obtenido con los fundamentos conceptuales, procedimentales, estratégico-operacionales y los recursos tecnológicos utilizados en el desarrollo del producto.

**Tabla 6**  
*Matriz de articulación.*

<b>EJES O PARTES PRINCIPALES</b>	<b>SUSTENTO TEÓRICO</b>	<b>SUSTENTO METODOLÓGICO</b>	<b>ESTRATEGIAS / TÉCNICAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>INSTRUMENTOS APLICADOS</b>
1. Análisis de Requerimientos	Fundamentos de automatización	Análisis de requisitos y diseño centrado en el usuario. Metodologías de diseño de sistemas HMI.	Entrevistas con usuarios finales, revisión de literatura técnica, estudio de casos. Identificación de requisitos funcionales y no funcionales del HMI.	Identificación de necesidades y especificación detallada de las funciones y características del HMI.	Cuestionarios estructurados, análisis documental. Reuniones de análisis de requerimientos. Documentación técnica.
2. Diseño de la Interfaz HMI	Principios de diseño de interfaces de usuario.	Maneras de crear modelos iniciales y planificar cómo será la interacción de los usuarios con el sistema.	Diseño de la interfaz gráfica del HMI, pruebas de usabilidad.	Creación de un prototipo interactivo de la interfaz de usuario.	Software WinnCC Flexible , Software TIA Portal para el diseño de la interface, técnicas de evaluación.
3. Desarrollo del Sistema HMI	Conocimientos en programación y	Metodologías ágiles de desarrollo de software	Desarrollo del software del HMI. Software compatible con el PLC S7-1200.	Implementación de la comunicación con los dispositivos periféricos.	TIA Portal, Step 7 (para programación en lenguaje Ladder), Profinet.

	desarrollo de software.	y buenas prácticas de codificación.			
Desarrollo del Skid, Tablero de control, instalación de sensores, Bomba	Diseño de estructura mecánica, selección de sensores, programación	Normativas, hojas técnicas, límites operativos	Desarrollo de algoritmos, Acondicionamiento de señales	Ensamble de equipos, electrónicos y estructura mecánica	Herramientas manuales, Sensor Nivel, Sensor Presión, Sensor Flujo, Bomba Piston
Prueba en fabrica	Conocimientos en instalación y configuración de sistemas industriales.	Procesos de puesta en marcha y mantenimiento de sistemas. Pruebas de Sistema Manual y Sistema con instrumentos electrónicos.	Instalación y configuración del HMI en el entorno de producción.	Puesta en marcha del sistema y capacitación del personal	Herramientas de diagnóstico y monitoreo del PLC S7-1200.

Nota. Elaboración propia

## 2.5. Análisis de Resultados

### 2.5.1. Efectividad de la interfaz humano-máquina (HMI):

La tabla 7, muestra los resultados de una encuesta con metodología de comunicación por llamada virtual, realizada a 60 operadores del departamento de levantamiento artificial de petróleo de diferentes campos ecuatorianos, buscando entender si la interface es amigable, punto de vista desde el lado del usuario, además de demostrar la efectividad en optimización operativa y obtener puntos de mejora.

**Tabla 7**

*Encuesta telefónica para registrar datos de usuarios.*

Método de presentación	SKID con HMI en Taller
Método de encuesta	Llamada virtual
Usuarios	Operadores Levantamiento Artificial
Número de encuestas	60
Comprensión registro método manual	15% desea mantener el proceso manual
Comprensión registro método con HMI	85% desea mantener el proceso con HMI
Tiempo en realizar una medición sin HMI	30 minutos por pozo cada semana
Tiempo en realizar una medición con HMI	Tiempo real, lecturas en milisegundos.
Retroalimentación positiva interface	90%
Retroalimentación negativa interface	10%
Recomendación mejora	Incluir control y otras funcionalidades.

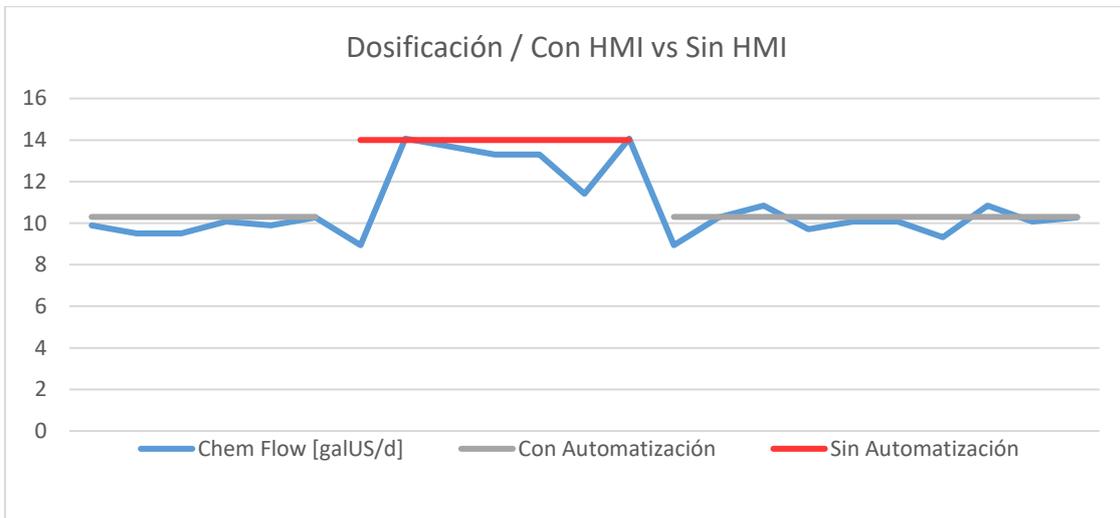
*Nota.* Elaboración propia.

Se determinan resultados positivos al realizar encuestas telefónicas con simples preguntas enfocadas en diferentes aspectos como 1) el nivel de comprensión para demostrar que la interface diseñada es amigable, 2) el tiempo de medición antes y después de la implementación, que determina que el incluir sensores ayuda ampliamente a la optimización de tiempo y mejora de confiabilidad de la información, 3) retroalimentación con puntos de mejora en el cual los usuarios recomiendan seguir trabajando en modelos más complejos con inclusión de algoritmos y control en lazo cerrado.

#### 2. Optimización del proceso de dosificación química:

Se compararon los registros de dosificación antes y después de la implementación de la HMI para calcular el porcentaje de reducción de errores, los resultados se exponen en la Figura 35.

**Figura 35**  
 Dosificación / Con HMI vs Sin HMI

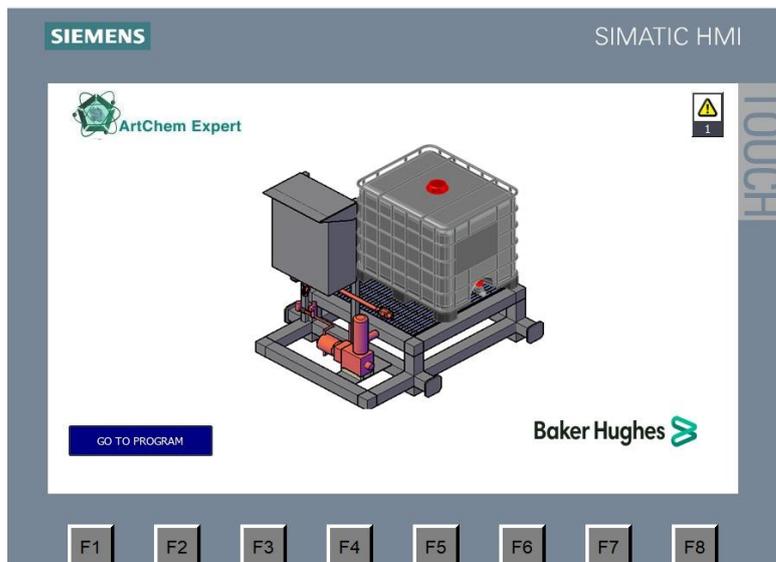


*Nota.* Elaboración propia.

Resultado: Con automatización se obtiene una precisión de 99% en la data medida por los sensores en comparación a la data interpretada por el operador utilizando un método manual resultó en un 40% de porcentaje de error.

En las Figuras, 36 a la 43, se muestran los resultados gráficos obtenidos en la interface humano maquina diseñada:

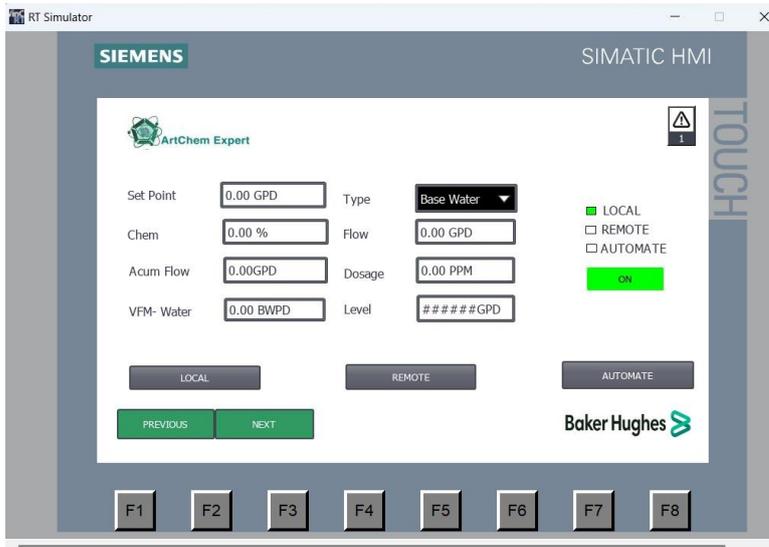
**Figura 36**  
 HMI-Pantalla Inicio



La Figura 36 corresponde a una pantalla de bienvenida que muestra de forma gráfica todos los componentes del proyecto y tiene un botón para acceso a la pantalla principal.

*Nota.* Elaboración Propia

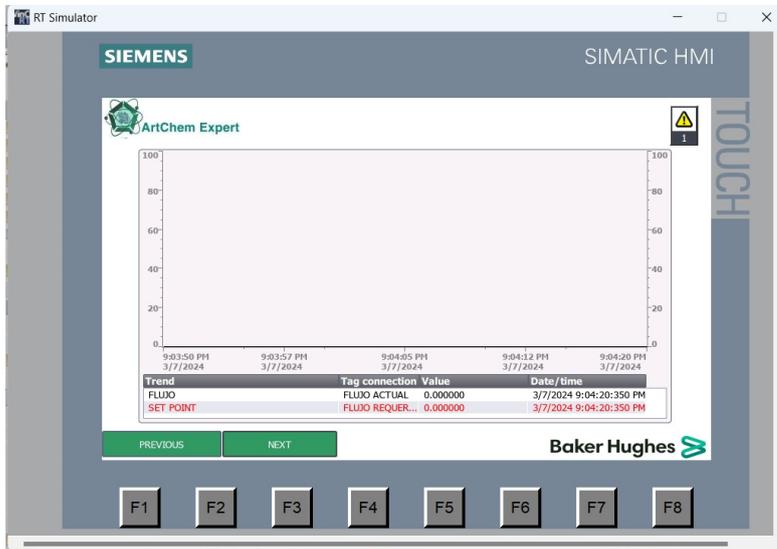
**Figura 37**  
HMI-Pantalla Principal



La Figura 37 corresponde a la pantalla de inicio que muestra los valores de los sensores de flujo, presión y nivel además tiene botones para encender y apagar la bomba de dosificación y botones de navegación.

Nota. Elaboración Propia

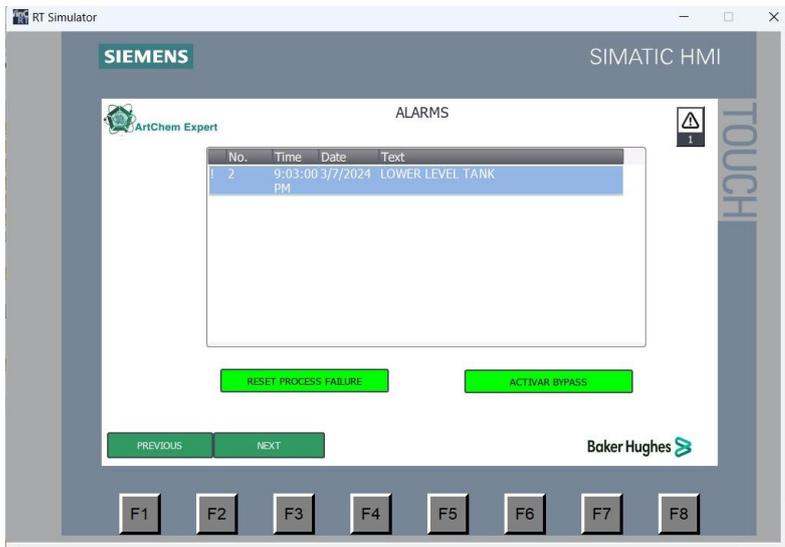
**Figura 38**  
HMI-Pantalla Tendencias



La Figura 38 corresponde a las tendencias medidas por el sensor de Flujo. Además, dispone también de botones de navegación entre pantallas.

Nota. Elaboración Propia

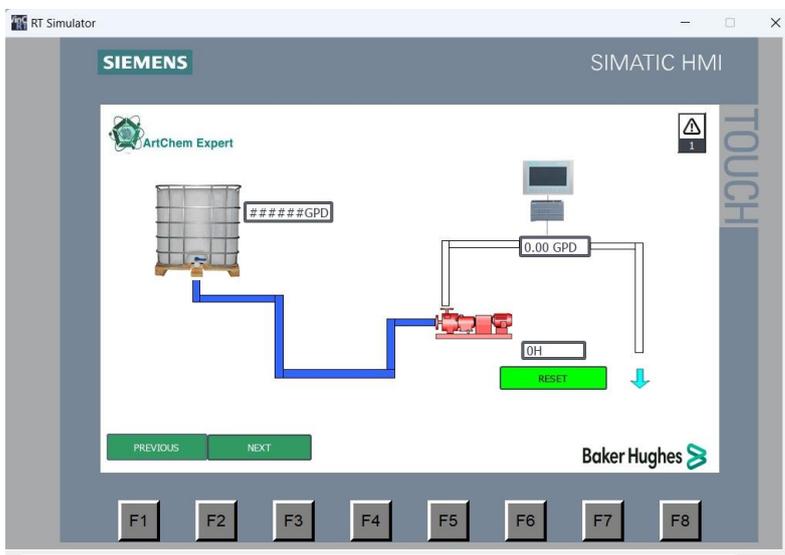
**Figura 39**  
**Pantalla HMI-Alarmas**



La Figura 39 muestra la pantalla con el resumen de alarmas activas, alarmas históricas además tiene botones de navegación entre pantallas.

**Nota. Elaboración Propia**

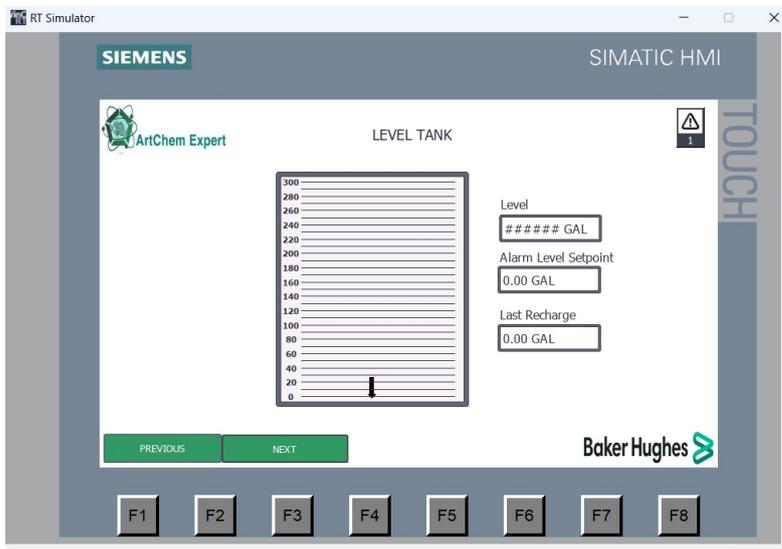
**Figura 40**  
**HMI-Pantalla Proceso**



La Figura 40 muestra la pantalla de proceso, con una interface visual y valores de cada uno de los sensores, además tiene botones de navegación entre pantallas.

**Nota. Elaboración Propia**

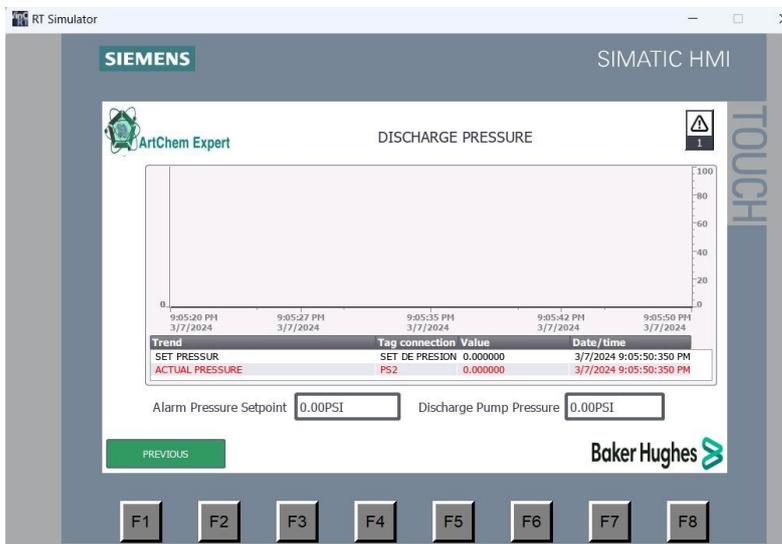
**Figura 41**  
HMI-Pantalla Nivel



La Figura 41 muestra la pantalla de nivel de tanque, permite configurar una alarma de bajo nivel de tanque, muestra el valor de la última reposición de producto químico y dispone de botones de navegación entre pantallas.

Nota. Elaboración Propia

**Figura 42**  
Pantalla HMI-Presión



La Figura 42 muestra la pantalla de tendencia de presión a la salida de la bomba, permite configurar una alarma de alta presión de descarga y dispone de botones de navegación entre pantallas.

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 43 se muestra una fotografía del prototipo del Skid de dosificación de química desarrollado en el presente trabajo.

**Figura 43**  
*Fotografía prototipo HMI dosificación química*



*Nota. Fotografía.*

## CONCLUSIONES

- Se concluye que, en la actualidad, gran cantidad de los sistemas de dosificación química en la industria del petróleo obedecen en gran parte de la intervención humana, durante este proceso, los operadores utilizan visores mirillas como indicador visual de flujo y bombas de pistón con ajuste manual.
- Se elaboró un prototipo que consta de una pantalla HMI para la supervisión, un PLC para el procesamiento de datos, un puerto de comunicación Modbus, una bomba de pistón para la dosificación precisa de productos químicos, adicional se incluyó un sensor de nivel en el tanque de químico, un sensor de presión que detecta líneas capilares taponadas y un sensor de flujo basado en efecto Hall para monitorear las condiciones del sistema. Estos componentes trabajan juntos para garantizar al usuario una dosificación química eficiente en los pozos petroleros.
- El presente proyecto tiene escalabilidad con la capacidad de añadir más algoritmos y funciones en base a las necesidades operativas.
- En el presente proyecto de investigación, se optó por un método cuantitativo, centrado en la utilización de encuestas personales como principal instrumento para realizar la recolección de datos importantes. Los resultados muestran un 63% de fallas atribuibles a la inyección química, el operador ocupa gran cantidad de su tiempo en registrar y calibrar las bombas para dosificar la química de forma manual, el 96 % de operadores piensa que es importante incluir sensores y una interface HMI al proceso de inyección de química, finalmente el 100% están dispuestos a correr un piloto de automatización de dosificación química.
- Se consiguió elaborar un prototipo con una interface HMI, sensores adecuados para medir, nivel, flujo, presión, y con una metodología cuantitativa mediante encuestas se determinó la eficacia del diseño con un 90% de satisfacción.
- El 100% de los expertos técnicos encuestados están totalmente de acuerdo que el presente proyecto tiene una buena calidad técnica.
- Se concluye que con interface HMI se obtiene una precisión de 99% en la data medida por los sensores en comparación a la data interpretada por el operador utilizando un método manual resultó en un 40% de porcentaje de error.
- La revisión exhaustiva de los fundamentos teóricos relacionados con la dosificación química en pozos petroleros proporcionó una base sólida para el diseño e implementación del presente proyecto.

- La precisión y confiabilidad de los cálculos de flujo obtenidos mediante este método respaldan su utilidad en el monitoreo y control del proceso de dosificación química.
- La identificación y selección de sensores adecuados, como el sensor de flujo por efecto Hall, el sensor de presión y el sensor de nivel, fueron fundamentales para mejorar la precisión y la confiabilidad de las mediciones en el sistema de dosificación química.
- La integración de estos sensores permitió una monitorización más precisa y en tiempo real de variables críticas, facilitando la detección temprana de posibles problemas y mejorando la eficiencia operativa.
- La implementación y validación de la HMI permitió una interacción intuitiva y eficiente con el sistema de dosificación química, mejorando la facilidad de uso por parte de los operadores.
- La comparación entre el sistema visual de mirilla y el sistema digitalizado de contabilización de flujo demostró la superioridad del segundo en términos de precisión en la medición del flujo de químicos.
- El proyecto de titulación logró alcanzar los objetivos establecidos, demostrando mejoras significativas en la dosificación química en pozos petroleros mediante la implementación de una interfaz humano-máquina y la integración de sensores avanzados. Estos hallazgos tienen el potencial de impactar positivamente la eficiencia operativa en la producción de petróleo.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios en condiciones de campo para evaluar el rendimiento de los sensores seleccionados en entornos operativos reales. Esto permitirá identificar posibles desafíos y ajustes necesarios para optimizar su funcionamiento.
- Se recomienda investigar y evaluar inclusión de nuevas tecnologías emergentes, como redes neuronales para dosificación inteligente y cálculos virtuales. Estas tecnologías podrían ofrecer nuevas formas de interacción y mayor precisión en la operación.
- Se sugiere investigar la integración de sistemas de monitoreo remoto y análisis de datos, como sistemas SCADA y plataformas de análisis en la nube, para optimizar la supervisión y la toma de decisiones en tiempo real en la dosificación química en pozos petroleros.
- Se recomienda difundir y socializar los resultados y mejores prácticas obtenidos en el proyecto de titulación mediante la realización de seminarios, conferencias o publicaciones en revistas especializadas. Esto permitirá compartir conocimientos y experiencias con la comunidad científica y la industria petrolera, contribuyendo así al avance y la mejora continua en este campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adesanwo, M., Denney, T., Lazarus, S., & Bello, O. (2016). Prescriptive-Based Decision Support System For Online Real-Time Electrical Submersible Pump Operations. *SPE*, 18.
- Balcells, J., & Romeral, J. L. (2009). *Automatas programables*. Barcelona: Marcombo.
- Benavides, O. (2021). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE TRATAMIENTO*. Obtenido de Repositorio UPTC: [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/8420/1/Programa\\_tratamiento\\_quimico\\_control\\_corrosion.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/8420/1/Programa_tratamiento_quimico_control_corrosion.pdf)
- CERDA, L. M. (2023). *Sistemas hidráulicos y neumáticos*. México: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Creus, A. (2005). *Instrumentación industrial*. España: Marcombo.
- Díaz, Rubio, & Urdaneta. (2006). *Interfaz Hombre Máquina (HMI) para Bancos de prueba de Pozos*. Maracaibo.
- Edson, P. (2023). *Diseño e implementación de un Sistema de Levantamiento Artificial Combinado Gas Lift – Bombeo Electrosumergible para incrementar la Producción Del Campo Tatarenda*. Obtenido de Repositorio UMSA: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/33040>
- Faye, A. (2020). *Likert Scale Data Linear Modeling*. Chicago: Independently Published.
- Fernández, D. (30 de 3 de 2021). *Novedades automatización*. Obtenido de Crecimiento continuo de las redes industriales: <https://novedadesautomatizacion.com/estudio-redes-industriales-hms-2021/>
- Flowmeters, A. (1 de 10 de 2023). *AW Positive Displacement Flow Meters*. Obtenido de awflowmeters: [www.awflowmeters.com](http://www.awflowmeters.com)
- Gualacata, N. (2020). *Análisis de tendencias históricas de los patrones de comportamiento en equipos electrosumergibles para el monitoreo de pozos en el campo Palo Azul*. Quito.
- Guccione, S. (2016). *Human Machine Interface Concepts and Projects*. Illinois : Industrial Press.
- Hughes, B. (2022). *Submersible Pump handbook*. Oklahoma.
- León, J., & Pillajo, D. (2013). *Diseño e Implementación de un sistema de control para la dosificación de material químico*. Obtenido de Repositorio ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7486>
- Márquez, J. F. (2021). Historia de los Autómatas Programables. *DOCPLAYER*, 16. Obtenido de Historia de los Autómatas Programables.
- Mayperot. (1 de 03 de 2024). *Medidor Flujo*. Obtenido de Mayperot: <https://www.ociotiendas.com/producto/visor-mirillas-de-aceite-2/>
- Miguel, J. (2015). *Protección de Datos y Seguridad de la Información*. España: RA-MA.
- MiltonRoy. (2024). *Fabrica bombas*. Obtenido de Miltonroy: <https://www.miltonroy.com/es-ec/>
- Miranda, R. (2022). Sistema automático de ovoscopia para análisis de calidad de huevos de gallina. *ESPOG*, 116.

- Molina, J., & Jiménez, M. (2013). *Programación gráfica para ingenieros*. Chicago: Marcombo.
- Monzó, R. S. (2014). *Automatismos Industriales*. Valencia: Nau Llibres.
- Pallas, R. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Catalunya: Marcombo Boixareu.
- Poma, E. (2023). *Diseño e implementación de un Sistema de Levantamiento Artificial Combinado Gas Lift – Bombeo Electrosumergible para incrementar la Producción Del Campo Tatarenda*. La Paz.
- QuestionPro. (2024). *Encuestas*. Obtenido de QuestionPro: <https://www.questionpro.com/a/editSurvey.do?surveyID=11968896>
- Siemens. (2024). *S7-1200 Programmable controller*. Obtenido de System Manual : [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att\\_106119/v1/s71200\\_system\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf)
- Vega, E. (2021). *Seguridad de la información*. España: 3Ciencias.
- Ynzunza, C. B., Izar, J. M., Bocarando, J. G., Pereyra, F. A., & Osorio, M. L. (7 de 12 de 2017). *Conciencia Tecnológica*. Obtenido de El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras: <file:///C:/Users/cordjuac/Downloads/Dialnet-ElEntornoDeLaIndustria40-6405835.pdf>